

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

**Technická diagnostika plynových
ucpávek kompresorů**

Technical diagnostics of gas seals for
compressors

Student:	Pavla Karbanová
Osobní číslo:	KAR0152
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jan Blata, Ph.D.

Hrabůvka 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavla Karbanová**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování**
Téma: **Technická diagnostika plynových ucpávek kompresorů**
Technical Diagnostics of Gas Seals for Compressors
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

V rámci závěrečné práce se zabývejte problematikou plynových ucpávek kompresorů. Ucpávky jsou určeny pro petrochemický průmysl, s čímž souvisí problematika agresivního prostředí a nutnost splnění patřičných norem dle API. Zabývejte se možnostmi sledování technického stavu těchto ucpávek za pomoci vhodných metod. Proveďte patřičné návrhy, měření a následná vyhodnocení.

V rámci zadání zpracujte:

1. Režerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Rozsah práce min. 35 stran textu.

Seznam doporučené odborné literatury:

HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost I - Tribodiagnostika*. 1. vydání, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2001, 158 s. ISBN 80-7078-883-6

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

ČSN 20 0065 *Metody měření a hodnocení mechanického kmitání-Mezní hodnoty kmitání*. Praha: Český normalizační institut, červen 1992. 16 s.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

ČSN 20 0065 *Metody měření a hodnocení mechanického kmitání - Mezní hodnoty kmitání*. Praha: Český normalizační institut, červen 1992. 16 s.

Interní podkladové materiály

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2020

Datum odevzdání: 17.05.2021

doc. Ing. Jiří Fries, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.
děkan fakulty

Kontaktní osoba: Ing. J. Blata, Ph.D. | E-mail: jblata@fd.cvut.cz

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 15.05.2021

Prohlašuji, že:

- jsem si vědoma, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen „**autorský zákon**“), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),

- beru na vědomí, že Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „**VŠB-TUO**“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 autorského zákona),

- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,

- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),

- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bude tato bakalářská práce uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 15.05.2021

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KARBANOVÁ, P. Technická diagnostika plynových ucpávek kompresorů: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2020, 56 stran. Vedoucí práce: Blata, J.

Bakalářská práce se zabývá tématem plynových ucpávek v petrochemickém průmyslu, jejich popisem vzhledu a funkcí, měření a následné vyhodnocení tohoto měření s možnostmi, jak výsledky tohoto měření využít ke zlepšení jak konstrukce, tak výroby daných ucpávek.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KARBANOVÁ, P. Technical diagnostics of gas seals for compressors. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production machines and construction, 2020, 56 pages, Thesis head: Blata, J.

Bachelor thesis is handling with gas seals in petrochemical industry, their description of appearance and function, measurement and consecutive evaluation of this measurement with options how to use this measurement for improvement of both construction and production of that seals.

Obsah

Seznam zkratk	8
Úvod.....	9
1 Mechanické ucpávky.....	10
1.1 Definování ucpávky.....	10
1.2 Historie.....	10
1.2.1 Těsněné plyny	11
1.2.2 Oblasti použití plynových ucpávek.....	11
1.2.3 Důvody použití plynových ucpávek.....	11
1.3 Základní části mechanické plynové cartrigové ucpávky	11
1.4 Detailní pohled na jednotlivé části ucpávky	14
1.5 Další důležité pojmy a části ve světě ucpávek.....	18
2 Měřicí čidla a princip funkce	24
2.1 Jednotlivé druhy čidel.....	24
2.1.1 Teplotní čidla	24
2.1.2 Průsaková čidla	26
2.1.3 Vibrační čidla	27
3 Výsledky měření a jejich interpretace.....	30
3.1 Důvody instalace čidel.....	30
3.2 Jednotlivé příklady měření a jeho interpretace	30
3.3 Celkové shrnutí měření.....	36
4 Důsledky poruch v ucpávkách	38
4.1 Příklady důsledků poruch v ucpávkách	38
5 Závěry a zhodnocení práce.....	54
Seznam použitých zdrojů	56

Seznam zkratek

JC	obchodní společnost John Crane a.s.
NACE	National Association of Corrosion Engineers – Národní asociace korozních inženýrů
API	American Petroleum Institute – Americký ropný institut
DLC	Diamond like coating – jakoby diamantové povlakování
ATEX	Appareils destinés à être utilisés en Atmosphères Explosibles- Přístroje pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu
RTD	Resistance temperature detector-odporový teplotní snímač
LNG	Liquefied natural gas-zkapalněný zemní plyn
GTL	Gas to liquids-plyn na kapaliny (zkapalněný zemní plyn)
PTFE	Polytetrafluorethylen
GSM	Groupe Spécial Mobile-Speciální mobilní skupina

Úvod

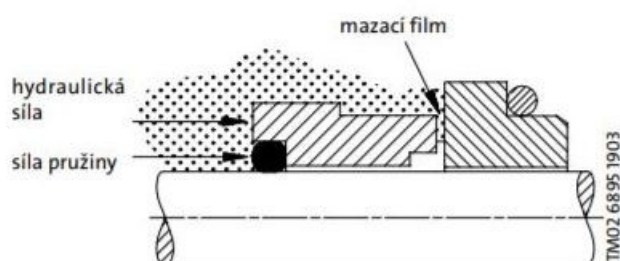
Mechanické plynové ucpávky kompresorů v petrochemickém průmyslu mají velice důležitou funkci, těsní v kompresoru prostor kolem hřídele, aby těsněný plyn neunikal do okolí, což je jak bezpečné, tak ekonomické a ekologické. Na následujících řádcích bude vysvětlena funkce plynových ucpávek, jejich konstrukce, druhy a možnosti zastavení do kompresoru, dále bude osvětleno, jaké snímače se do ucpávek dají vložit, princip jejich funkce a jejich význam uvnitř ucpávky.

Cílem této bakalářské práce je seznámit se s principy funkce ucpávek, jejich konstrukcí, principy funkce a požadavky na měřicí snímače a vyhodnocením výstupů z nich. Budou popsány jednotlivé typy používaných ucpávek, důvody jejich použití, postupný vývoj designu, zlepšování funkčnosti až po nejnovější typ jménem Aura, jež používá společnost John Crane a.s.

1 Mechanické ucpávky

1.1 Definování ucpávky

Mechanickou ucpávku jako takovou si můžeme definovat jako zábranu proti úniku média z vymezeného prostoru. Umísťují se do prostoru, kde dochází k únikům média. Jako příklad si můžeme uvést vodní čerpadlo v elektrárně, kde se ucpávkou bude řešit průsak mezi rotační hřídelí a rámem stroje, kde zjednodušeně řečeno vložíme mechanickou ucpávku ze dvou částí – statoru a rotoru, těsnění jako takové probíhá mezi dvěma těsnícími členy, kde jeden rotuje (náleží rotoru) a druhý je statický (náleží statoru), u těchto dvou těsnících členů se vzájemně „dotýkají“ (ve skutečnosti se nedotýkají, je mezi nimi fluidní těsnící film, viz níže) lapované plochy kde probíhá těsnění. Zásadní pro funkci ucpávky je, že nikdy netěsní na 100 %, vždy musí alespoň maličko prosakovat.



Obr. 1.1. Rotační hřídelová ucpávka

zdroj: https://marcomplet.cz/docs/Grundfos/hridelove_ucpavky.pdf

1.2 Historie

Historie mechanických ucpávek se začala psát na začátku 20. století, kdy George R. Cook vymyslel těsnění (tedy první mechanickou ucpávku) na chladírenský kompresor. První komerčně úspěšná ucpávka byla instalována v roce 1928. Ve třicátých letech se jako materiál těsnících elementů používala kalená ocel a olovnatý bronz, následně do ucpávek přibýly i o kroužky (jako sekundární těsnění) vynalezené ve třicátých letech, avšak používané po druhé světové válce. V roce 1942 nastal velký pokrok při vývoji mechanických ucpávek, byla vyvinuta tzv. kazetová (cartridgeová) ucpávka (o tomto typu ucpávky bude pojednávat tato práce), jejíž hlavní výhodou a důvodem, proč se prosadila na trhu, je možnost zkompletovat si ucpávku mimo strojní zařízení a následně ji vložit na hřídel jako jeden kus, což usnadňuje montáž a servis. Co se týče výrobců, tento trh je velmi konsolidovaný, v podstatě jsou dva hlavní hráči, Flowserve a John Crane (o jehož ucpávkách tato práce pojednává), kteří vznikli sloučením mnoha menších firem zhruba v polovině minulého století.

1.2.1 Těsněné plyny

Ucpávky těsní různé druhy plynů, které si můžeme rozřadit na základě užití kompresoru, například při sběru a přepravě plynu se těsní LNG (kapalný zemní plyn) a GTL (zkapalněný zemní plyn), v petrochemických závodech těsníme například ethylen, methanol a butilové polymery, v organické chemii těsníme například čpavek, močovinu, acetyly a kyselinu dusičnou.

1.2.2 Oblasti použití plynových ucpávek

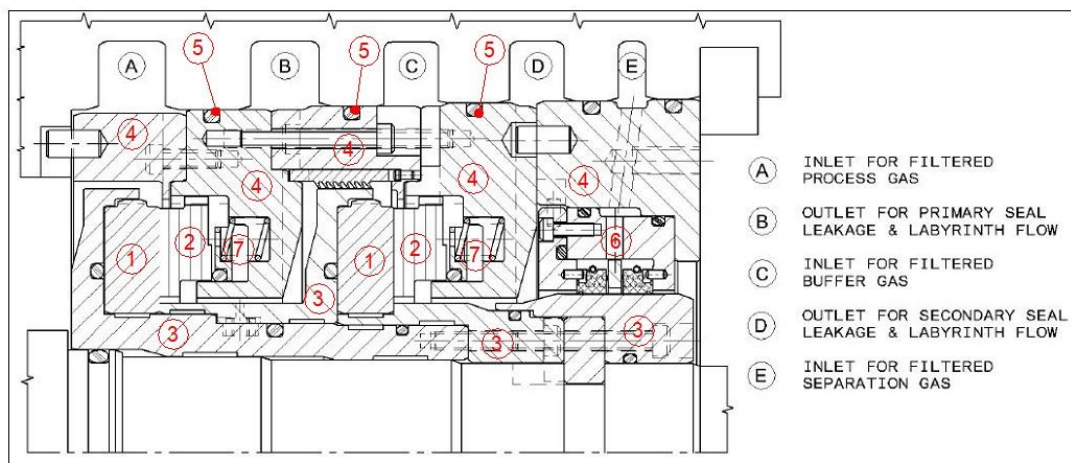
Principiálně můžeme říci, že mechanické plynové ucpávky se používají ve všech kompresorech, u kterých je třeba zabránit úniku čerpaného plynu. Jako dobrý příklad může posloužit přeprava plynu plynovody, kde se nachází, aby plyn proudil na místo určení, kompresorové stanice, které plyn ženou dále, tyto kompresory většinou bývají větších rozměrů (klidně průměru hřídele přes půl metru), nedosahují vysokých obvodových rychlostí, zato v nich bývají vyšší tlaky, implementujeme tedy na obě strany kompresoru plynové ucpávky.

1.2.3 Důvody použití plynových ucpávek

Primárně se ucpávky užívají k zamezení úniků těsněného plynu, dalšími důvody jsou například součinnost při udržení tlaku v kompresoru, oddělení ložisek od kompresoru, zamezení úniku plynu do okolního prostředí, ať už z důvodů ochrany zdraví, tak environmentálních, tedy snaha snížit znečištění životního prostředí.

1.3 Základní části mechanické plynové cartrigové ucpávky

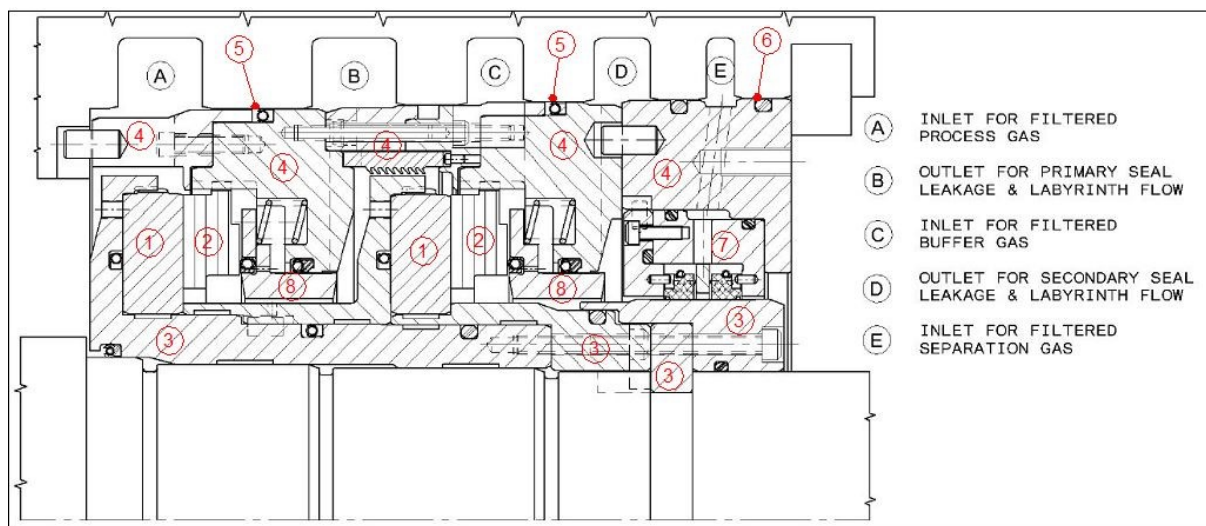
Tato práce se věnuje cartrigovým mechanickým plynovým ucpávkám, konkrétně výrobkům firmy John Crane, která je předním výrobcem ucpávek přinášejícím inovace do tohoto průmyslu. Ucpávka, na které si budeme vše ukazovat, je tzv. tandemový typ, v ucpávce se nacházejí dva těsnící stupně. Jsou tři základní druhy ucpávek, co se používají, nejstarší jménem AT, novější a momentálně nejpoužívanější XP a nejnovější Aura. V této kapitole je jen jednoduchý přehled jednotlivých prvků, detailní popis je v následujících kapitolách. Zde je důležitá poznámka, že ucpávky, co budou v této práci, jsou standartní a při návrhu skutečné ucpávky do skutečného stroje se velice často upravuje geometrie tak, aby seděla do „mezery“ mezi hřídelí a rámem stroje.



*Obr. 1.2: Standartní ucpávka typu AT
zdroj: interní materiál JC*

Popis:

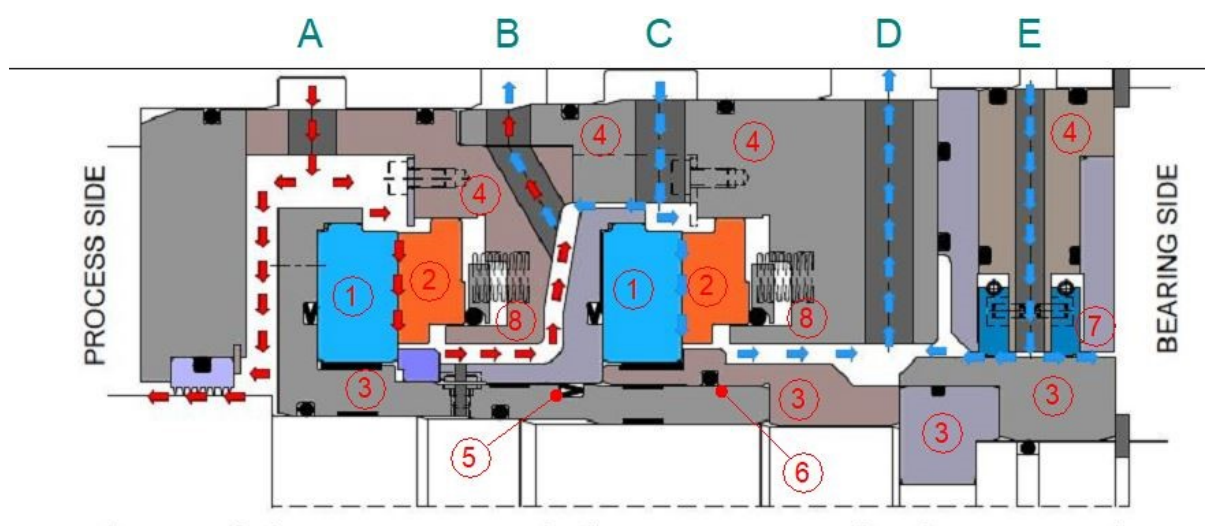
- 1 – Sedlo: těsnící prvek na rotoru, těsnící strana lapovaná s mělkými drážkami
- 2 – Čelo: těsnící prvek na statoru, těsnící strana lapovaná
- 3 – Rotor: prvek ucpávky zajišťující rotaci sedla
- 4 – Stator: prvek ucpávky zajišťující nerotaci čela
- 5 – O kroužky: těsnění ucpávky eliminující nežádoucí průsak
- 6 – Separation seal: prvek izolující ucpávku od oleje z ložisek, používaný i jako pojistka při selhání ucpávky (nemusí být použita, lze použít labyrint, záleží na konkrétní aplikaci)
- 7 – Přítlačná pružina: zajišťuje přítlak čela na sedlo
- A – Průduch přivádějící do ucpávky filtrovaný těsněný plyn
- B – Průduch odvádějící z ucpávky těsněný plyn po prvním stupni těsnění
- C – Průduch vhánějící do ucpávky inertní plyn (N₂) do protisměru k těsněnému plynu
- D – Průduch odvádějící z ucpávky těsněný plyn po druhém stupni těsnění
- E – Průduch pro přivádění inertního plynu (N₂) do separation seal do protisměru k těsněnému plynu



Obr. 1.3: Standardní ucpávka typu XP
zdroj: interní materiály JC

Popis:

- 1 – Sedlo: těsnící prvek na rotoru, těsnící strana lapovaná s mělkými drážkami
- 2 – Čelo: Těsnící prvek na statoru, těsnící strana lapovaná
- 3 – Rotor: prvek ucpávky zajišťující rotaci sedla
- 4 – Stator: prvek ucpávky zajišťující nerotaci čela
- 5 – Polymerové těsnění: těsnění ucpávky eliminující nežádoucí průsak, více odolné než o kroužky
- 6 – O kroužky: těsnění ucpávky eliminující nežádoucí průsak
- 7 – Separation seal: prvek izolující ucpávku od oleje u ložisek, používaný i jako pojistka při selhání ucpávky (nemusí být použita, lze použít labyrint, záleží na konkrétní aplikaci)
- 8 – Carrier s pružinou – zajišťuje přítlak sedla na čelo
- A – Průduch přivádějící do ucpávky filtrovaný těsněný plyn
- B – Průduch odvádějící z ucpávky těsněný plyn po prvním stupni těsnění
- C – Průduch vhánějící do ucpávky inertní plyn (N₂) do protisměru k těsněnému plynu
- D – Průduch odvádějící z ucpávky těsněný plyn po druhém stupni těsnění
- E – Průduch pro přivádění inertního plynu (N₂) do separation seal do protisměru k těsněnému plynu



Obr. 1.4: Standardní ucpávka typu Aura
zdroj: interní materiály JC

Popis:

- 1 – Sedlo: těsnící prvek na rotoru, těsnící strana lapovaná s mělkými drážkami
- 2 – Čelo: těsnící prvek na statoru, těsnící strana lapovaná
- 3 – Rotor: prvek ucpávky zajišťující rotaci sedla
- 4 – Stator: prvek ucpávky zajišťující nerotaci čela
- 5 – Polymerové těsnění: těsnění ucpávky eliminující nežádoucí průsak, odolnější než o kroužky
- 6 – O kroužky: těsnění ucpávky eliminující nežádoucí průsak
- 7 – Separation seal: prvek izolující ucpávku od oleje z ložisek, používaný i jako pojistka při selhání ucpávky (nemusí být použita, lze použít labyrint, záleží na konkrétní aplikaci)
- 8 – Přítlačná pružina: zajišťuje přítlak sedla na čelo
- A – Průduch přivádějící do ucpávky filtrovaný těsněný plyn
- B – Průduch odvádějící z ucpávky těsněný plyn po prvním stupni těsnění
- C – Průduch vhánějící do ucpávky inertní plyn (N₂) do protisměru k těsněnému plynu
- D – Průduch odvádějící z ucpávky těsněný plyn po druhém stupni těsnění
- E – Průduch pro přivádění inertního plynu (N₂) do separation seal do protisměru k těsněnému plynu

1.4 Detailní pohled na jednotlivé části ucpávky

Sedlo: tato část ucpávky je vyráběna z SiC (karbid křemíku), je používána pro své vlastnosti jako je vysoká tvrdost, odolnost proti poškození povrchu, odolnost proti vibracím, dříve se používal WC (karbid wolframu), ovšem technologie jde vpřed, používá se karbid křemíku mající lepší vlastnosti. Také se zde prosazuje povlakování DLC (Diamond like coating – jakoby diamantové povlakování, povlakování velice tenkou a zároveň velice tvrdou vrstvou zlepšující vlastnosti sedla). V jeho

geometrii jsou zásadní dvě věci, těsnící strana je lapovaná na velice nízkou drsnost, a na téže straně je velmi mělké (do hloubky několika mikronů) drážkování, zajišťující vznik těsnící fluidní vrstvy (o šíři několika mikronů) tím, že se plyn dostává do drážek (vhodně tvarovaných, tvar je firemní tajemství), od sebe odděluje sedlo a čelo a umožňuje vznik fluidní vrstvy. Vnitropodnikově by se dalo společně s čelem považovat sedlo za standardizovaný díl, jelikož pro vznik fluidní těsnící mezery je nutné, aby geometrie součástí splňovala podmínky, které jsou firemním tajemstvím.

Čelo: tato část ucpávky je vyráběna z uhlíku (C), pro svou schopnost samomaznosti, bohužel však není vhodný na použití pro vysoké tlaky (nad sto barů), kde se používá vyšší třída uhlíku. U této součástky je v geometrii zásadní lapovaná těsnící strana potřebná pro vznik těsnící fluidní vrstvy. Do statoru je vloženo a úhlově je zaaretováno pomocí kolíků.

Rotor: tato část ucpávky je tvořena více dílci jak je vidět na obr. 1.4, dílce jsou tvořeny ocelí dle standardu NACE (National association of corrosion engineers – asociace korozních inženýrů, celosvětová společnost zabývající se korozi a doporučující nejlepší korozi odolné materiály, zabývá se též materiály odolnými proti sulfidovému (sirnému) praskání), konkrétně NACE MR0175/ISO 15156 a NACE MR0103¹, říkájící, které materiály odolné vůči sulfidovému praskání, a vůči prostředí při výrobě ropy a plynu obsahujícím sulfan. Zde je také třeba zmínit normu API 617 (American Petroleum Institute – Americký ropný institut), o které se detailněji bude hovořit později, předepisuje krom jiného, jaké materiály je vhodné použít do ucpávek, vhodnými materiály jsou nerezové slitiny. Dílce, ze kterých je rotor vyroben, jsou v podstatě různé příruby, jak je vidět na obr. 1.4, jsou spojeny šrouby a úhlově vymezení je provedeno pomocí kolíků a per. V rotoru se používají součástky s názvem finger spring, což jsou v podstatě vymezovací kroužky na průměr pod sedlem, dále toleranční kroužky mající stejný úkol, které jsou mezi jednotlivými přírubami (na obr. 1.4 to jsou černé tenké „plátky“), dále se na rotor nasazují o kroužky, o těch později. Z konstrukčního pohledu se rotor snažíme dělat s co nejmenší hmotou (čím menší hmota, tím menší síla potřebná pro rozběh), dále musíme respektovat tvar hřídele zákazníka a celkově prostor pro zastavení ucpávky. Zásadní je též část geometrie rotoru zajišťující jeho kompaktnost.

Stator: Tato součást ucpávky je jako rotor tvořena více dílci (viz obr. 1.4), ocelí dle standardu NACE MR0175/ISO 15156 a NACE MR0103 a API 617. Jednotlivé dílce jsou v podstatě příruby, spojeny pomocí šroubů a úhlově vymezené kolíky a pery, dále se na stator nasazují o kroužky, o kterých se bude hovořit později. Na statoru se nachází důležité prvky jako například průduchy (viz obr. 1.4), které odvádí/přivádí plyn do/z ucpávky, dále prvky vymezující polohu čela a separation seal. Z konstrukčního pohledu je důležité se soustředit na polohu, velikost a četnost

¹ International Standard NACE MR0175. *Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production*. Houston: NACE International, 2015, ISBN: MR0175/ISO15156.

ČSN ISO 15156. *Naftový a plynárenský průmysl - Materiály pro využití v prostředí obsahujícím H₂S z těžby ropy a zemního plynu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 24 s., třídící znak: 450032.

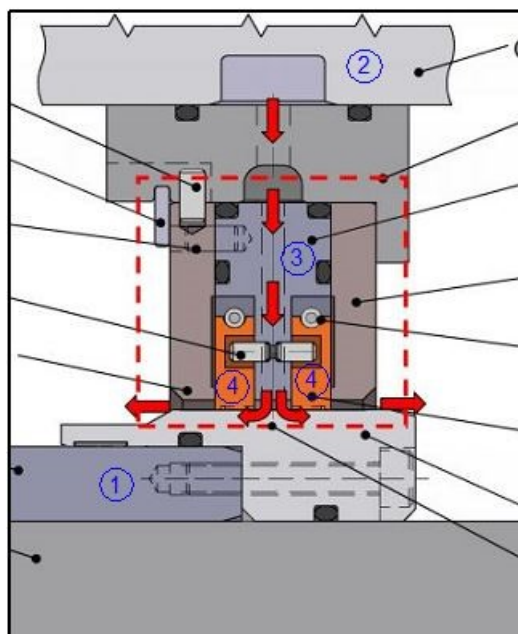
International Standard NACE MR0103. *Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments*. Houston: NACE International, 2015, ISBN: 1-57590-168-4.

průduchů, respektovat tvar prostoru pro uložení zákazníka. Jak stator, tak i rotor jsou velice variabilní části, jelikož výroba ucpávek je téměř kusová výroba (opakovatelnost během roku při výrobě je pod dvěma kusy), je třeba se plně přizpůsobit potřebám zákazníka, což znamená pro konstruktéra přizpůsobit se prostoru mezi rámem stroje a hřídelí, kde je třeba ucpávku uložit.

Polymerové těsnění: Jak vychází už z názvu této součásti ucpávky, používá se k utěsnění dílů jak na rotoru, tak na statoru k zamezení nežádoucího průsaku plynu jinými „cestami“, než těmi, které jsou pro plyn designované. Materiál, ze kterého se těsnění vyrábí je většinou PTFE (polytetrafluorethylen), materiál jak chemicky, tak teplotně odolný (až 200 °C). Začalo se používat, jelikož je vhodné i pro vysoké tlaky, na rozdíl od o kroužků. Geometrie těsnění v řezu vypadá jako písmeno „vé“, mající uvnitř pružinu, nataženou po celém průměru (přesný tvar je firemní tajemství), otevřená strana „vé“ míří směrem k vyššímu tlaku.

O kroužky: Stejně jako polymerové těsnění se používají k utěsnění dílů a zamezení nežádoucího průsaku plynu jak na statoru, tak na rotoru. Materiálem používaným na o kroužky je fluorokarbon, který je chemicky odolný. Jeho průřezem je, jak už naznačuje název, kruh.

Separation seal: Vnitrofiremně se používají dva typy, T83 a 93FR, jelikož se více používá 93FR, uvedeme si ji zde jako příklad. Na následujícím obrázku je zobrazeno, jaké části 93FR separation seal náleží.



Obr.1.5: 93FR separation seal

zdroj: materiál JC

Popis:

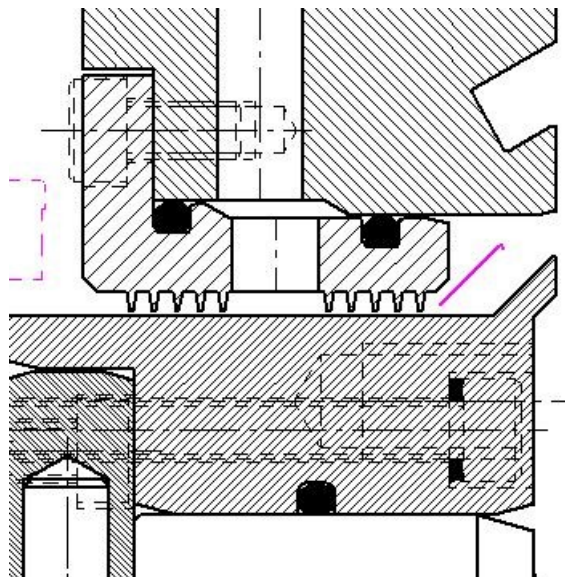
1 – Rotor: Tato část není přímo separation seal, je ovšem důležité zde uvést, že na rotorové části, která je v kontaktu se separation seal, je třeba provést nástřík karbidem wolframu (velice tvrdý nástřík pro eliminaci opotřebení).

2 – Rám stroje: Zde je uveden hlavně pro přehlednost

3 – Tělo separation seal: Skládá se z více částí, jak je vidět na obr. 1.5, je vyrobeno z ocelí dle standardu NACE MR0175/ISO 15156 a NACE MR0103 a API 617 stejně jako rotor a stator. Dále, jak je z obr. 1.5 zřejmé, je třeba vyvrtat díry na průduchy na inertní plyn (N₂) a mezi jednotlivé části vložit o kroužky tak, aby nedocházelo k nežádoucímu průsaku. U dvou bočních segmentů těla separation seal je třeba dbát na nízkou drsnost povrchu na vnitřní straně (viz níže), úhlové vymezení je provedeno pomocí kolíků, axiální pomocí přídržných segmentů.

4 – Karbonový kroužek: Tato část, jak vyplývá z názvu, je vyrobena z uhlíku, má kruhový tvar, je tvořen ze tří segmentů svázaných dohromady pomocí svazujícího elementu. Funkčně má karbonový kroužek za úkol samotné těsnění, je to funkční prvek separation seal.

Hlavní funkcí separation seal je oddělení ucpávky od ložisek, jejich oleje a působení pomocí vhánění inertního plynu (N₂) do protisměru skrz průduch E (viz obr. 1.4), dále také slouží jako poslední možnost těsnění pokud první dva stupně selžou. V některých aplikacích se používá jen labyrint (viz obr. 1.6) se stejnou funkcí oddělit ucpávku a ložiska.



Obr. 1.6: Labyrint
zdroj: materiál JC

Přítlačná pružina: Tento díl je velice důležitý pro funkci ucpávky, přitlačuje totiž čelo na sedlo, čímž pomáhá ke vzniku fluidní těsnicí vrstvy a pomáhá eliminovat efekt axiálního pohybu rotoru ucpávky. Pružina je vyrobená ze slitiny niklu, molybdenu a chromu s přidavkem wolframu (C 276), materiál vynikající svou korozi odolností.

1.5 Další důležité pojmy a části ve světě ucpávek

Fluidní vrstva: Jak už bylo zmíněno dříve, fluidní vrstva je naprosto klíčová k funkci ucpávky, vzniká mezi sedlem a čelem při rotaci, jejímu vzniku napomáhají drážky v sedle (viz předchozí).

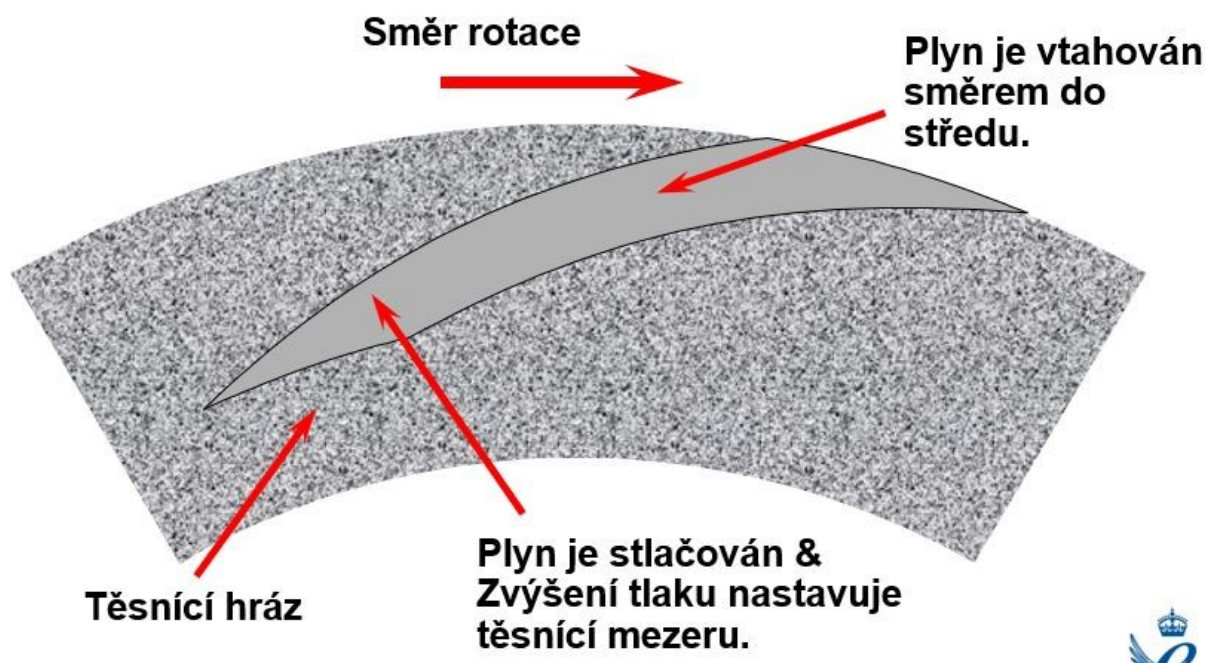
Rozpětí pracovních podmínek ucpávky: Za prvé je třeba zdůraznit, že parametry jako je obvodová rychlost, jsou v nepřímé úměře s velikostí ucpávky (čím větší ucpávka, tím menší rychlost). Maximální tlak je až 200 barů, teplota od -20 až po +200 °C, obvodová rychlost až 120 m/s. Rozměrově se ucpávky pohybují standardně od 2.187" po 12.125" na balančním průměru. Samozřejmě se dělají i ucpávky jiných rozměrů a jiných provozních podmínek, ovšem vždy na základě specifikace zákazníka, dnes už se pracuje na ucpávkách na těsnění řádově vyšších stovek barů.

Drážky na sedle: Drážky na těsnící straně sedla se nacházejí na lapované ploše, jejich geometrie je přísně tajná, ovšem principiálně si můžeme říci, že se dělí na jednosměrné a obousměrné, viz obr. 1.7, kde je vlevo jednosměrná a vpravo obousměrná varianta drážek.



*Obr. 1.7: Varianty drážkování sedla dle směru rotace
zdroj: materiál JC*

Na obr. 1.8 je velmi srozumitelně vysvětlen princip funkce drážek při rozběhu kompresoru, vidíme zde směr rotace ucpávky a vtahování plynu do drážky potřebné pro vznik fluidní těsnící vrstvy.



Obr. 1.8: Princip funkce drážky při rozběhu kompresoru
zdroj: materiály JC

Balanční průměr: Průměr, na kterém dochází k samotnému těsnění.

Lift off speed: Rychlost kompresoru, za které se během rozběhu „nadzdvihne“ čelo od sedla a vytvoří se těsnící fluidní vrstva. U každé ucpávky má jinou hodnotu na základě tlaku, velikosti ucpávky atd.

Axiální posuv rotoru ucpávky: Důležitý faktor, jež je třeba zohlednit při návrhu ucpávky, je způsoben axiálním pohybem kompresoru jako takového, pohybuje se do ± 3 mm.

NACE MR0175/ISO 15156 a MR0103: Doporučení od Asociace korozních inženýrů, doporučující které druhy ocelových slitin jsou vhodné na použití do zařízení na těžbu, výrobu a úpravu ropy a zemního plynu s obsahem H_2S (sulfanu), do prostředí představující riziko jak zdravotní, tak bezpečnostní, jak pro obsluhu zařízení, tak pro zařízení samotné.² Pro konstrukci a výrobu ucpávky je u těchto standardů zásadní, že předepisují, při jakých koncentracích těsněných plynů se mají použít jaké materiály, samozřejmě se to týká především „železa“, tedy částí statoru, rotoru a separation seal.

API 617: API (American Petroleum Institut – Americký ropný institut) je v podstatě ústav řešící normy v petrochemickém průmyslu. Konkrétně norma API 617 upravuje a předepisuje podmínky

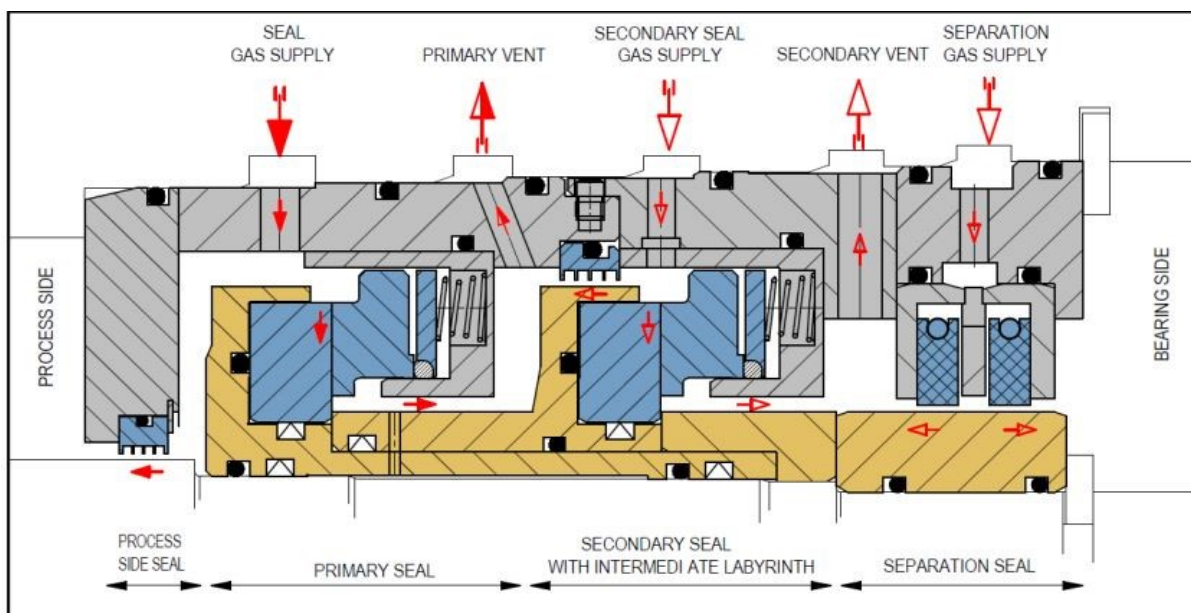
² International Standard NACE MR0175. *Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H_2S -containing environments in oil and gas production*. Houston: NACE International, 2015, ISBN: MR0175/ISO15156.

International Standard NACE MR0103. *Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments*. Houston: NACE International, 2015, ISBN: 1-57590-168-4.

Standardy NACE MR0175/ISO 15156 a MR0103, dostupné z: <https://store.nace.org/>.

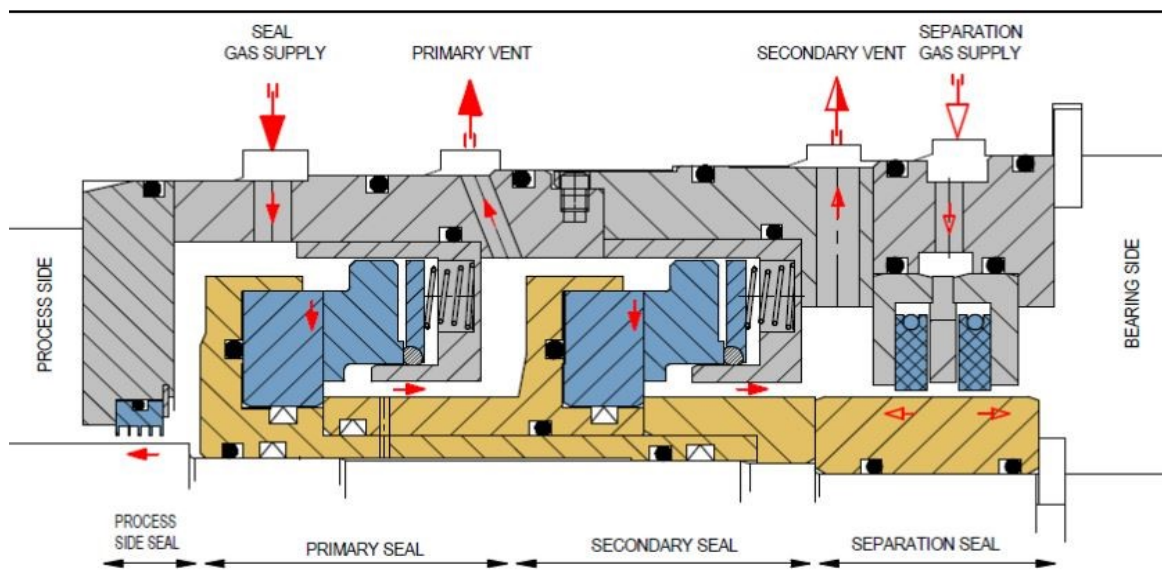
užití kompresorů včetně ucpávek v petrochemii, použití materiálů, podmínky testování, prostě řeší vše ohledně kompresorů v petrochemii.

API 692: Novější norma než API 617, upravuje konkrétně ucpávky v kompresorech v petrochemii, přesněji vymezuje, co vše musí ucpávka splnit, aby dostala potvrzení, že je funkční a bezpečná a strojní zařízení s ní může být z pohledu bezpečnosti ucpávky spuštěno. Tato norma se samozřejmě odkazuje na normu API 617 a standardy NACE MR01757/ISO 15156 a MR0103, o kterých je psáno výše, dále také na API 521 (systémy uvolnění tlaku a jeho snižování), API 526 (přetlakové ventily) a mnoho dalších, ve zkratce se všechny týkají petrochemického průmyslu. Dále určuje, jaké druhy ucpávek lze použít - tandemová s vnitřním labyrintem viz obr. 1.9, tandemová ucpávka viz obr. 1.10, dvojitá ucpávka viz obr. 1.11, jednoduchá ucpávka viz obr. 1.12.

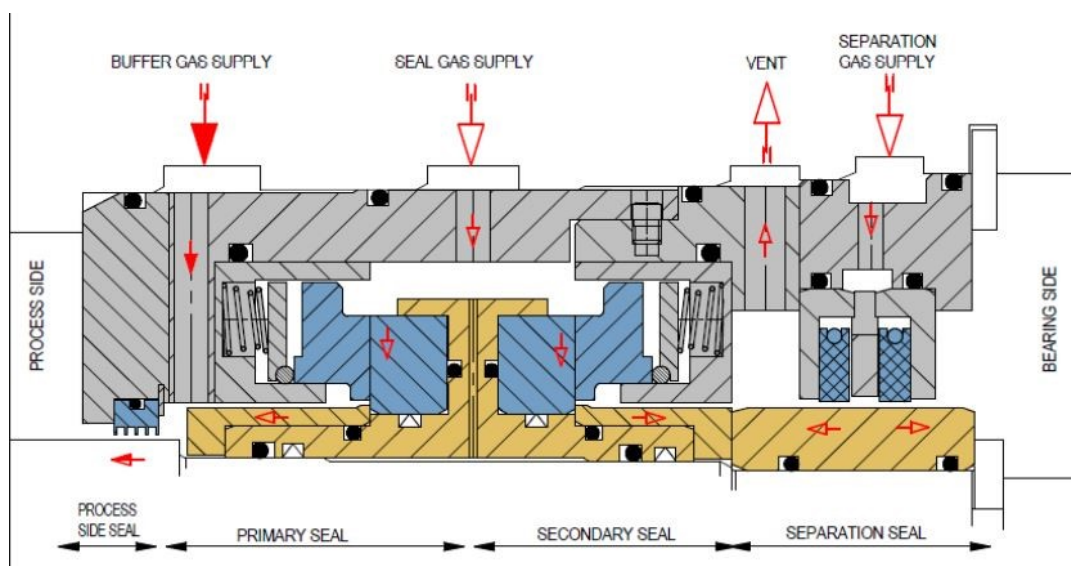


Obr. 1.9: tandemová ucpávka s vnitřním labyrintem

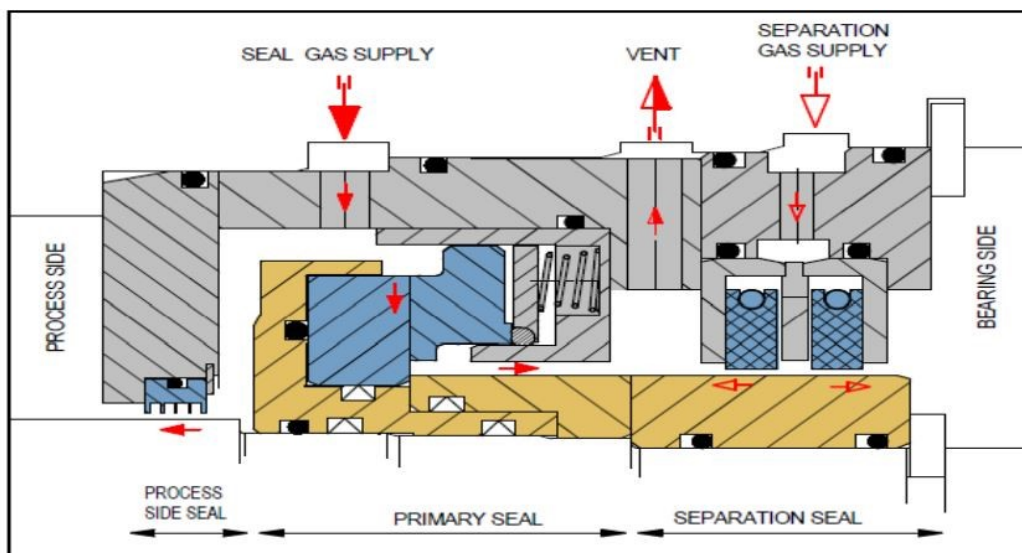
zdroj: norma API 692



Obr. 1.10: tandemová ucpávka
zdroj: norma API 692



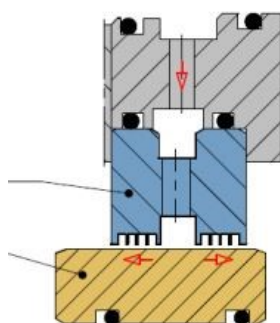
Obr. 1.11: dvojí ucpávka
zdroj: norma API 692



Obr. 1.12: jednoduchá ucpávka

zdroj: norma API 692

Další důležitou věcí, co upravuje daná API norma je separační labyrint, má stejnou funkci jako separation seal, oddělit od sebe ucpávku a prostor ložisek, viz obr. 1.13.



Obr. 1.13: Separační labyrint

zdroj: norma API 692

Testování ucpávky dle normy probíhá následovně, nejdříve musíme znát parametry ucpávky, mezní a pracovní tlak, mezní a pracovní teploty, mezní a pracovní otáčky. Při testování zjišťujeme, zda-li ucpávka jako taková zvládne zatížení a též reálné hodnoty průsaku a kroutícího momentu. Samotný proces testování se odehrává v tzv. testovacích buňkách, do kterých se ucpávka vloží a simulují se pracovní podmínky, proces testování má 68 částí, kdy je vždy ucpávka testována za určitých podmínek, například za maximální teploty a tlaku po dobu jedné minuty, jak staticky (ucpávka nerotuje), tak dynamicky (ucpávka rotuje), z čehož se samozřejmě vytvoří záznam a technická zpráva, která se následně předá zákazníkovi. Dále norma říká, z jakých částí by se měla ucpávka skládat (viz výše), předepisuje, jaké materiály je vhodné použít vzhledem k jejich mechanickým a chemickým vlastnostem, dále specifikuje veškerou dokumentaci, jež je k ucpávce třeba dodat, jakým způsobem by měla být ucpávka demontována, jaká se mohou naskytnout poškození, jak by mělo být přistupováno k průduchovému systému a systému filtrace, jaký by měl

být systém varování při poruše ucpávky/kompresoru, předepsané způsoby a procesy odeslání ucpávky.

Slow roll: Pomalý rozběh ucpávky, z konstrukčního pohledu znamená potřebu lehce pozměnit vnitřní geometrii ucpávky vzhledem k tomu, že trvá delší čas, než-li dojde k „nadzdvíhnutí“ sedla a vzniku fluidní vrstvy.

ATEX: Směrnice Evropské unie upravující prodej zařízení a ochranných systémů ve výbušném prostředí, tedy takovém, ve kterém jsou směsi plynů, par, mlhy a prachu, které se mohou vznítit. Dělí se na různé teplotní třídy, skupiny výbušnosti, kategorie prostředí a skupiny zařízení.

Instalace ucpávky: Jelikož ucpávka je cartridge designu, na místo určení se doručí složená, zajištěna tzv. setting platy, což jsou příruby zajišťující při převozu úhlovou pozici jak rotoru, tak statoru. Přímo před instalací se samozřejmě celá ucpávka a prostor pro její instalaci překontrolují, poté se dovnitř prostě „narazí“, sundají se setting platy, doskládá se kompresor a následně se ještě přezkouší funkčnost ucpávky.

2 Měřicí čidla a princip funkce

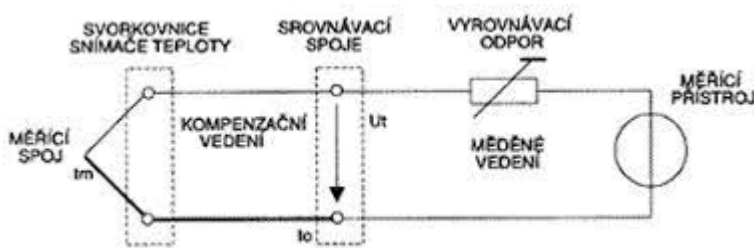
2.1 Jednotlivé druhy čidel

Zde je třeba nejdříve zdůraznit, že čidla vzhledem k umístění v ucpávce a jejímu pracovnímu prostředí je třeba, aby čidla splňovala více různých norem a standardů. Například ATEX, API 692, NACE MR0175/ISO 15156 a MR0103, jelikož ucpávka pracuje ve výbušném a korozivním prostředí v petrochemii. Dalším požadavkem je samozřejmě co nejmenší velikost samotného těla čidla, které by samozřejmě mělo být co nejmenší.

2.1.1 Teplotní čidla

V ucpávkách se používají dva typy teplotních čidel, termočlánek a RTD (Resistance Temperature Detectors – odporové teplotní detektory, termistory). Co se týče umístění v ucpávce, teplotní čidla se tedy umísťují na stator na jak první, tak druhý stupeň těsnění pro detekci toho, která část ucpávky se zahřívá, v čemž je nám toto rozestavení čidel velice nápomocné.

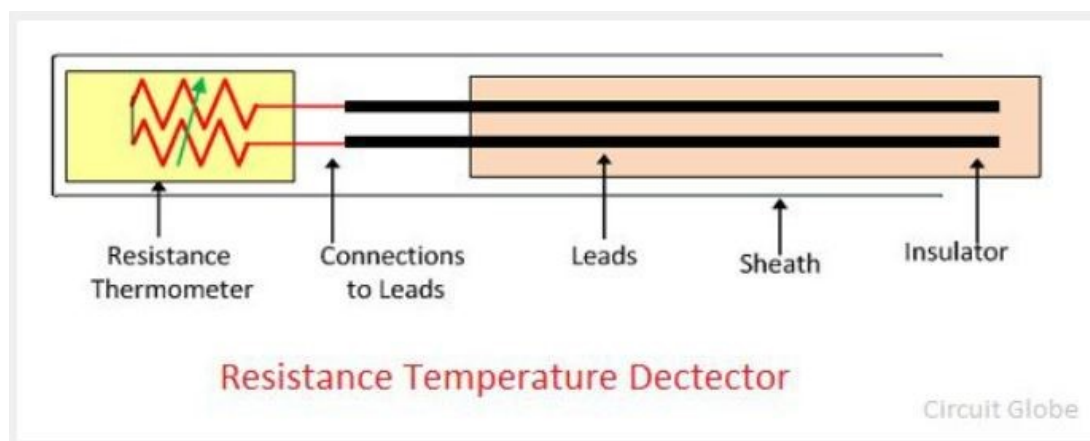
Termočlánek: Principem funkce termočlánu je termoelektrický jev (též označován jako Peltier - Seebeckův jev), který funguje na principu přeměny rozdílů teplot na elektrické napětí. Lze tedy používat jako zdroj elektrické energie, ovšem mnohem častěji se používá na měření teploty, jelikož jeho výkon a účinnost jsou malé, ovšem je velmi citlivý na změny teplot (mikrovolty na °C). Jak je vidět na obr. 2.1, složení termočlánu je následující, dva kovy (například platina rhodium nebo železo a konstantan (slitina mědi a niklu)) spojené do série, kov 1 – spoj 1-2 – kov 2 – spoj 2-1 – kov 1, ve chvíli, kdy mají spoje různou teplotu, různý elektrický potenciál, čímž vzniká elektrický proud, který se snímá a poté „převádí“ na teplotu. Měřicí rozsah má všeobecně od – 200 °C až po 1700 °C, přičemž samozřejmě záleží na konkrétním zvoleném typu. Vzhledově vypadá jako tenká kovová tyčinka nebo jako malý váleček. Zajímavostí termočlánu je, že na vesmírných sondách se používá jako zdroj energie, zejména díky své vysoké spolehlivosti.



Obr. 2.1: Schéma termočlánu

zdroj: https://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_tcl.htm

RTD: Je definován jako odpor pro měření teploty. Princip funkce termistoru je velmi prostý, v tomto měřicím prvku je elektrický odpor závislý na teplotě, přičemž čím je vyšší teplota, tím je větší odpor. Oproti termočláнку mají výhodu vyšší přesnosti měření. Měřicí rozsah RTD čidel je všeobecně od - 200 °C až po + 850 °C, přičemž samozřejmě záleží na konkrétně zvoleném typu. RTD je vyrobeno z čistého kovu, nejčastěji platiny, niklu či mědi, kovy, ze kterých je vyrobeno, mají kladný teplotní koeficient. Má lineární graf závislosti mezi odporem a teplotou, tj. je mezi nimi přímá úměra. Je vhodný pro měření vysokých teplot. Na obr. 2.2 je vyznačeno jeho schéma. Na obr. 2.3 je zobrazeno, jak může skutečně vypadat RTD čidlo.



Obr. 2.2: Schéma RTD čidla

zdroj: <https://illustrationprize.com/cs/69-difference-between-rtd-and-thermistor.html>



Obr. 2.3: Příklad skutečného RTD čidla

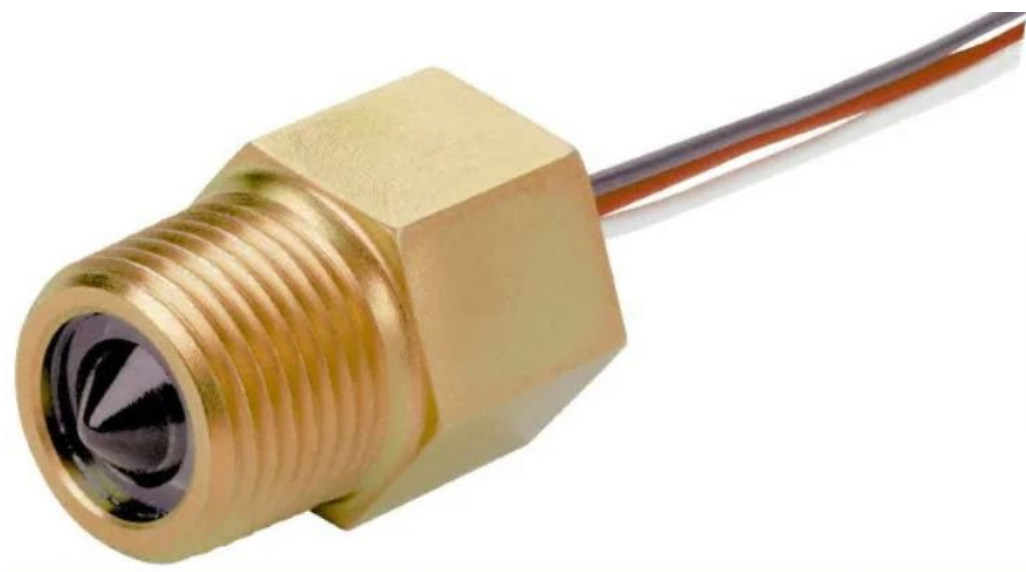
zdroj: interní materiál JC

Dále se pro měření teploty používají ještě například termistory nebo bezkontaktní teploměry různých typů, ovšem ty se pro naši aplikaci nehodí, bezkontaktní teploměry ze zřejmých důvodů (ucpávka je uvnitř rámu stroje), a termistory mají malý rozsah měřených teplot.

Při aplikaci teplotního snímače do ucpávky se rozhodují o konkrétním použití na základě více faktorů, ovšem hlavní roli hraje množství prostoru v ucpávce, jelikož termočlánekový snímač má menší průměr, používá se při aplikacích ve kterých je v ucpávce méně prostoru pro instalaci snímače.

2.1.2 Průsaková čidla

Průsakové čidlo se na ucpávce používá pro zjištění, zda-li protéká olej z ložisek. V ucpávkách se zatím používá jen optické průsakové čidlo, jelikož je vzhledem k požadavkům všech norem a standardů nejprůchodnější pro výrobu čidla s optickým snímačem. Princip funkce takovýchto snímačů je prostý, čidlem vede optické vlákno a ve chvíli, kdy se tok v optickém vlákne přeruší, je zřejmé že došlo k průsaku. Detailně to znamená, že na jedné straně vstupuje do čidla optické vlákno, které se uvnitř čidla „přivaří“ na čočku, na kterou se na druhé straně „přivaří“ výstupní optické vlákno (viz obr. 2.4, kde vidíme čočku a dva výstupní kabely).



Obr. 2.4: Příklad optického průsakového čidla

zdroj: Gems Sensors - 1/2" Thread, 2,500 Max psi, 212 °F Max, Liquid Level Electro-Optic Sensor - 75520866 - MSC Industrial Supply (mscdirect.com)

Tento typ čidla je též schopen detekovat, zda kapalina, kterou detekuje, je voda či olej, bohužel je ovšem třeba, aby kapka pokryla celou čočku, tudíž musí být kapka docela velká (až dva milimetry), čidlo též nezachytí mlhu. Tento typ čidla je třeba umístit na pozici 6:00, jednoduše kvůli gravitaci, kapky oleje i vody prostě padají dolů.

Jak vychází z předchozích řádků, toto čidlo má řekněme, velké rezervy, například zachytí až docela rozměrné kapky, tudíž musí docházet k signifikantním průsakům, než čidlo začne snímat, není schopno detekovat mlhu (ať už olejovou či vodní), což způsobuje pomalejší zjištění průsaků. Dále také pozice na 6:00 bývá občas trochu nešikovná, kabely s optickým vláknem mívají docela velké ohybové poloměry (klidně například přes dvanáct milimetrů), což je ve stísněných prostorech ucpávek náročné na zástavbu. Ovšem u průsakového čidla stejně jako u všech ostatních je velmi limitující skrz nutnost splnění všech norem a standardů. Do budoucna by se jako nejideálnější jevílo použít kapacitní čidlo, které by bylo schopno mnohem dříve zachytit jakékoliv průsaky (díky principu

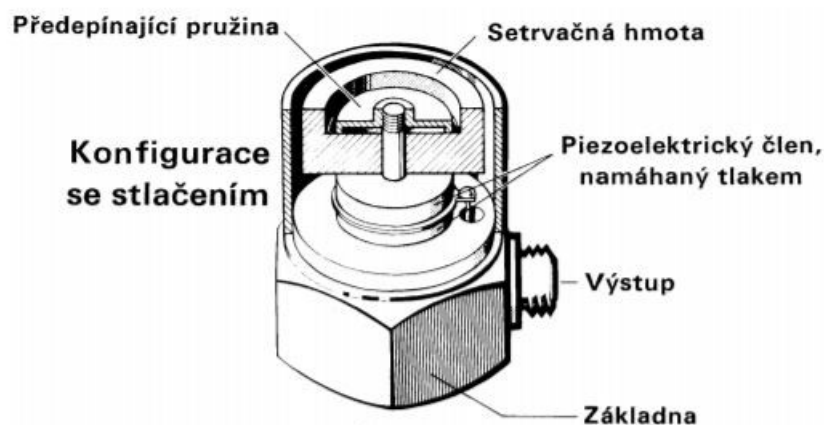
funkce, čidlo měří kapacitu a jediné co se mění je složení dielektrika, tj. díky změně kapacity by bylo zřejmé, že se mění dielektrikum, tudíž že se děje nějaký průsak a podle hodnot kapacity určit, co přesně se děje).

Z celkového pohledu tedy můžeme říci, že průsakové čidlo má rozhodně své limity, ale je stále lepší mít cokoliv, co je schopno říci, co se děje uvnitř ucpávky, i když řešení tímto průsakovým čidlem není úplně ideální.

Při instalaci tohoto snímače musím mít na paměti především úhlovou pozici (6:00) a také pozici jako takovou, aby snímač fungoval jak měl, je ideální jej umístit mezi ucpávku a separation seal.

2.1.3 Vibrační čidla

Vibrační čidla se v ucpávkách používají pro zjištění, zda-li dochází k nějakým vibracím, které mohou být způsobeny například kontaktem sedla a čela, což je samozřejmě nežádoucí. Čidlo, které se používá, je založeno na principu piezoelektrického jevu (piezoelektrický jev – schopnost krystalu generovat elektrické napětí při stlačení). Konstrukčně vypadá následovně, skládá se z pevné části připevněné k ucpávce, uvnitř které je umístěn piezoelektrický krystal, na který volně navazuje pružina, na kterou navazuje volně umístěný drobný kolík (viz obr. 2.5). Na obr. 2.6 (modrý obdélník zakrývá údaje prozrazující firemní tajemství) je zobrazeno, jak může vypadat vibrační čidlo uzpůsobené pro prostředí v ucpávce. Výhodami tohoto čidla jsou přesnost, malá velikost, dobrá odolnost proti vyšší teplotě a proti mechanickému namáhání.



Obr. 2.5: Princip složení vibračního čidla

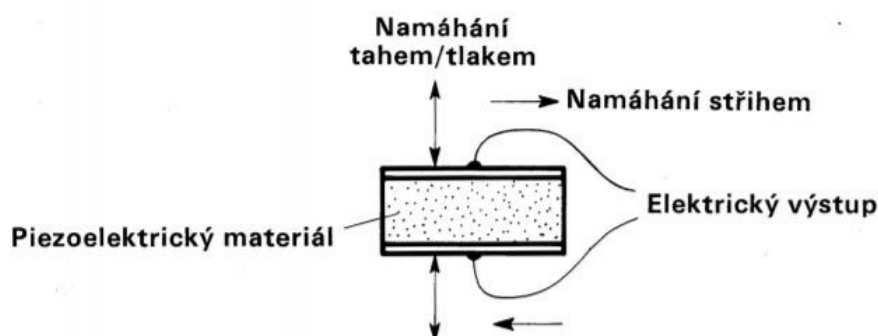
zdroj: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83272



Obr. 2.6: Skutečné vibrační čidlo

zdroj: <https://www.kistler.com/en/product/type-8152c/>

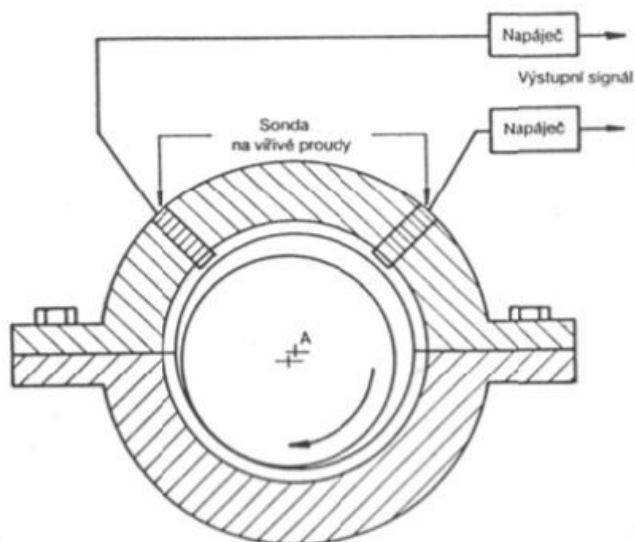
Samozřejmě existuje více různých druhů vibračních čidel, v podstatě jsou tři druhy, první jsou akcelerometry, což jsou například výše zmíněná vibrační čidla, mohou být buď tlaková nebo smyková (rozdíl je ve směru síly působící na piezoelektrický materiál, viz obr. 2.7). Jako piezoelektrický materiál se používá piezoelektrická keramická hmota.



Obr. 2.7: Namáhání piezoelektrického materiálu

zdroj: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83272

Dalším druhem vibračního čidla je snímač rychlosti vibrací, umísťující se běžně na rám stroje. Funguje na principu cívky, která kmitá kvůli vlivu vibrací v poli permanentního magnetu, z čehož je výstupem napěťový signál, jenž je přímo úměrný mechanické vibrační rychlosti tělesa. Jako poslední je třeba zmínit třetí druh snímače, bezdotykové sondy. Funguje na principu dvou vzájemně kolmých bezdotykových snímačů výchylky (viz obr. 2.8), jež fungují na principu vířivých proudů, cívka, jíž prochází vysokofrekvenční střídavý proud, generuje vysokofrekvenční magnetické pole, když jsou v tomto poli elektricky vodivé předměty (např. hřídele), jsou generovány vířivé proudy beroucí energii z magnetického pole. Výstupy z bezdotykových snímačů zaneseme do kartézského systému souřadnic, z čehož vyvstane zobrazení pohybu hřídele kolem osy rotace, což nazýváme orbitální analýzou. Z tvaru orbity můžeme vyčíst například stav ložisek.



Obr. 2.8: Uložení bezdotykových snímačů výchylky pro bezdotykové sondy
 zdroj: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Technicka-diagnostika-II-Vibrodiagnostika-skripta.pdf>

Při instalaci vibračního snímače musím mít na mysli především umístění na statoru tak, aby byl schopen snímat, tedy aby byl „přitlačen“ na stator ucpávky a snímal jak má, k čemuž použiji různé přidržovací kroužky se závity, které snímač k ucpávce dostatečně „přitlačí“

3 Výsledky měření a jejich interpretace

V této kapitole si detailněji popíšeme důvody instalace čidel, data, získaná z nich a vyhodnocení těchto dat. Data získáváme tak, že ze snímačů vedou vodiče (ať už optické z průsakového čidla, či vodiče z vibračního či teplotních snímačů) do převodníkového boxu, z něj do boxu s GSM modulem (slouží ke zprostředkování komunikace převodnímu boxu po internetové síti), který už může odesílat informace kamkoliv si zákazník přeje. Tento systém sběru dat nám tedy umožňuje sledovat v reálném čase dění uvnitř ucpávky, což je samozřejmě jeden z hlavních důvodů jejich instalace.

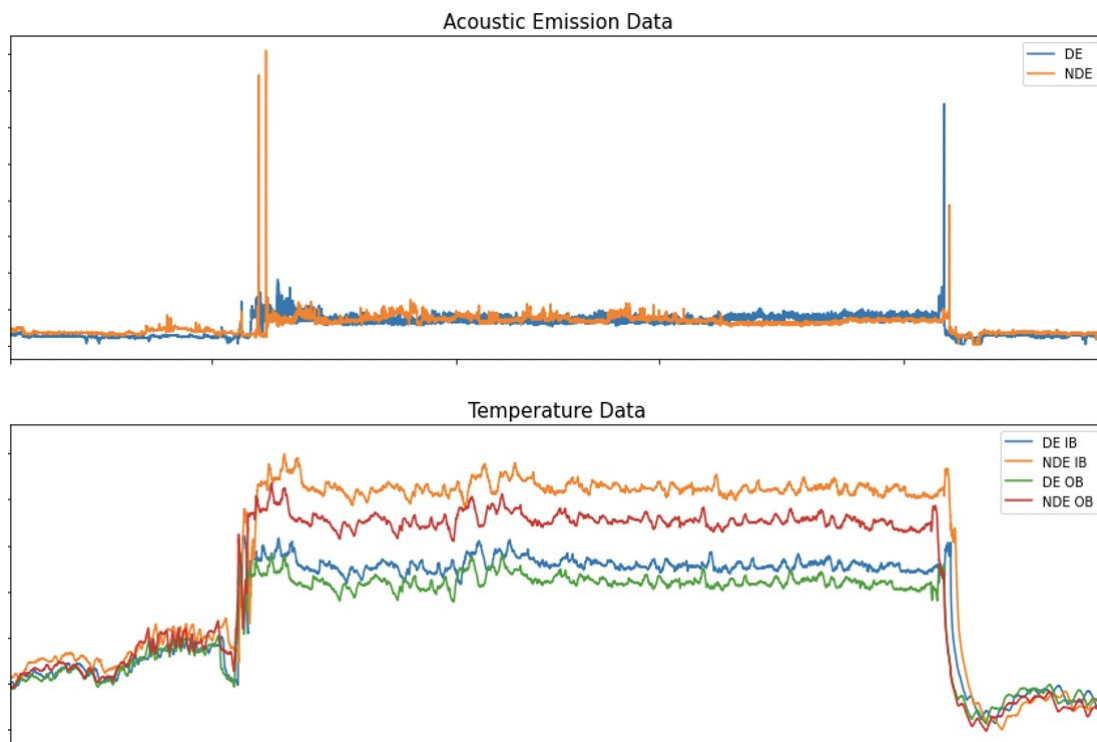
3.1 Důvody instalace čidel

Snímače dáváme do ucpávek z více důvodů, jako první si můžeme uvést například kontinuální sledování podmínek uvnitř ucpávky, což nám dává možnost daná data analyzovat a užít je ve výzkumu a vývoji a použít je tak ke zlepšení konstrukce ucpávky. Dalším důvodem instalace čidel je taktéž kontinuální sledování podmínek uvnitř ucpávky, v tomto případě kvůli okamžitému vyhodnocení stavu ucpávky a potažmo i celého systému včetně kompresoru, jelikož se mnohé poruchy kompresoru projeví nejprve na ucpávce, dále nám kontinuální sledování podmínek uvnitř ucpávky dává možnost zjistit ihned fatální poruchy a celý kompresor vypnout (central stop) a díky tomu zase jako u předchozího ochránit stroj před většími škodami. Z výše uvedeného tedy plyne, že instalací snímačů získáme jak lepší obrázek o dějích uvnitř ucpávky, tak možnost díky tomu bránit větším škodám na stroji.

3.2 Jednotlivé příklady měření a jeho interpretace

Zprv je třeba říci, že pro interpretaci dat není třeba znát konkrétní ucpávku, při interpretaci dat totiž sledujeme trendy, nikoliv absolutní hodnoty naměřených dat. A také kvůli firemnímu tajemství není úplně možné přesně identifikovat ucpávku, jelikož jsou to tajná data. Dále je třeba říci, že vždy měříme ucpávky na obou stranách, jak u pohonu, tak na druhé slepé straně.

Jako první představím normální průběh měření, tj. tak, jak by to mělo být, na následném grafu (graf 3.1) ukážu rozběh kompresoru, normální běh kompresoru a doběh stroje.



Graf 3.1: Běžný běh kompresoru

Nejprve si popíšme, co je co na grafu. Acoustic emission data, jsou data získaná z vibračního snímače. DE je drive end, tj. ucpávka u pohonu, má oranžovou barvu, NDE tj. no drive end je ucpávka na slepé straně, má modrou barvu. Temperature data jsou data získaná teplotními snímači. DE IB je drive end inboard, tj. ucpávka u pohonu, vnitřní teplotní čidlo, na grafu modré barvy. NDE IB je no drive end inboard, tj. ucpávka na slepé straně vnitřní teplotní čidlo, na grafu oranžové barvy. DE OB je drive end outboard, tj. ucpávka u pohonu, vnější teplotní čidlo, na grafu zelené barvy. NDE OB je no drive end outboard, tj. ucpávka na slepé straně, vnější teplotní čidlo, na grafu červené barvy. Na vodorovné ose grafu je proměnnou čas a na svislé velikost signálu v milivoltech. Proč není na grafu průsakové čidlo? Protože jeho výstupem je jen ANO/NE, podle intenzity signálu (firemní tajemství) se ještě určí, co přesně kápló (voda, olej atd.).

Začneme zdůrazněním toho, že pro celkovou analýzu nejsou důležité přesné hodnoty (čísla), sledujeme trendy, které nám data odhalují a na jejich základě můžeme diagnostikovat procesy v ucpávce. K tomu se též váže poznámka, k této práci nebudou přiložena hrubá data (tabulka hodnot, která čidla nasnímají), jelikož jsou firemním tajemstvím. Tento konkrétní pár ucpávek byl instalován v kompresoru, který běžel pouhý měsíc a poté byl vypnut na základě snížené poptávky, ovšem z provozního pohledu fungoval bez jakýchkoliv problémů.

Tedy tedy k samotnému grafu. Když půjdeme z leva do prava (tak jak data jdou ve skutečnosti), tak na začátku jsou hodnoty jak vibračních, tak všech teplotních čidel nízké, což nám napovídá, že kompresor je vypnut. Zde konkrétně vidíme nízké hodnoty teploty, ovšem v některých případech se stává, že zákazník si celý kompresor před spuštěním předehřívá, a tudíž se teplota zvyšuje už před rozběhem.

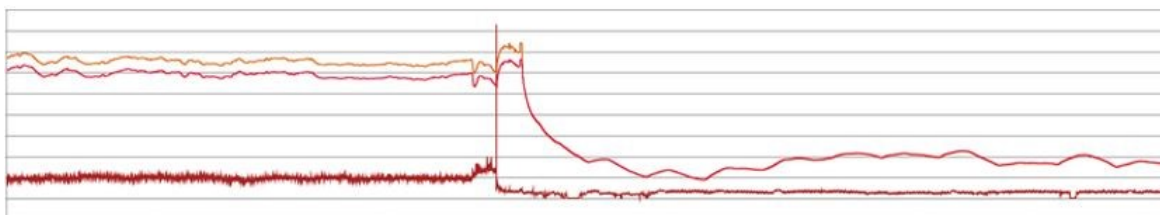
Dál můžeme vidět špičku na grafu vibračního čidla a zároveň růst na grafu teplotního čidla, které identifikujeme jako rozběh kompresoru. Proč při rozběhu kompresoru vidíme špičku na grafu vibračního čidla? Během rozběhu totiž nastane rychlost (lift off speed – viz kapitola 1), při které nastane „nadzdvíhnutí“ čela od sedla, během kterého se dotknou, což se projeví špičkou na diagramu. Proč roste teplota je zřejmé, pracovní teploty kompresorů se pohybují ve většině případů mezi 50 – 150 °C, tudíž logicky musí stoupat.

Následuje část bezporuchového chodu, kde vidíme zvýšenou teplotu na provozní hodnotu, oscilace, kterou vidíme, lze přičíst střídání dne a noci, jinak se na této části grafu neděje nic neobvyklého, vše funguje jak má. V této části v grafu vibračního čidla vidíme po špičce při rozběhu lehce zvýšené hodnoty vibrací, což připisujeme běhu kompresoru, jelikož když kompresor běží, vznikají vibrace.

Další částí na grafu je doběh kompresoru, kde na grafu teploty vidíme postupný pokles na teplotu okolí, prostě kompresor během doběhu postupně chladne, dokud nevychladne na teplotu okolí. Při bližším pohledu na doběhovou část grafu vibračního čidla vidíme špičku, která reprezentuje dosažení rychlosti lift off speed (viz kapitola 1), při které stejně jako při rozběhu dojde ke krátkému kontaktu sedla a čela, což se projeví špičkou v grafu a následným útlumem vibrací, jak lze vyčíst z grafu.

Zde je prostor pro pár poznámek k bezporuchovému chodu kompresoru s ucpávkami, při předehřevu kompresoru, jak bylo zmíněno výše, je vibrační čidlo v tomto případě jediné, které detekuje rozběh. Také může nastat případ, kdy je kompresor mimo provoz, a přesto z grafu vibračního čidla vyčteme špičky, to ve většině případů znamená jediné, na kompresoru byla provedena údržba, což se projevilo u vibračního čidla.

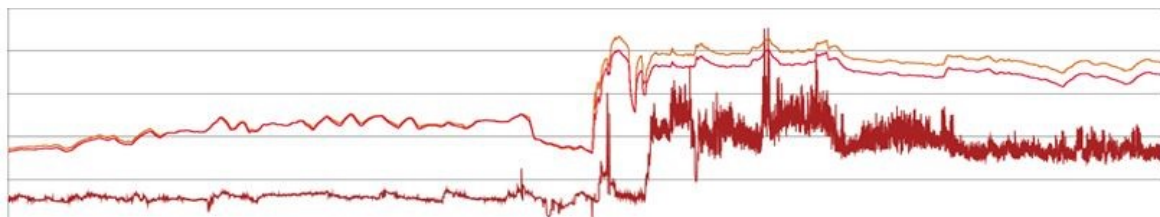
Na následujících grafech (grafy 3.2 až 3.5) ukážu další případy normálního rozběhu a doběhu kompresoru. Barevné rozlišení je následující, tmavě červená náleží vibračnímu čidlu, oranžová vnitřnímu teplotnímu čidlu a světle červená vnějšímu teplotnímu čidlu. Na grafu 3.2 vidíme normální doběh kompresoru, teploty klesají, funkce vibračního čidla má špičku tam, kde při doběhu kompresoru nastala rychlost lift off.



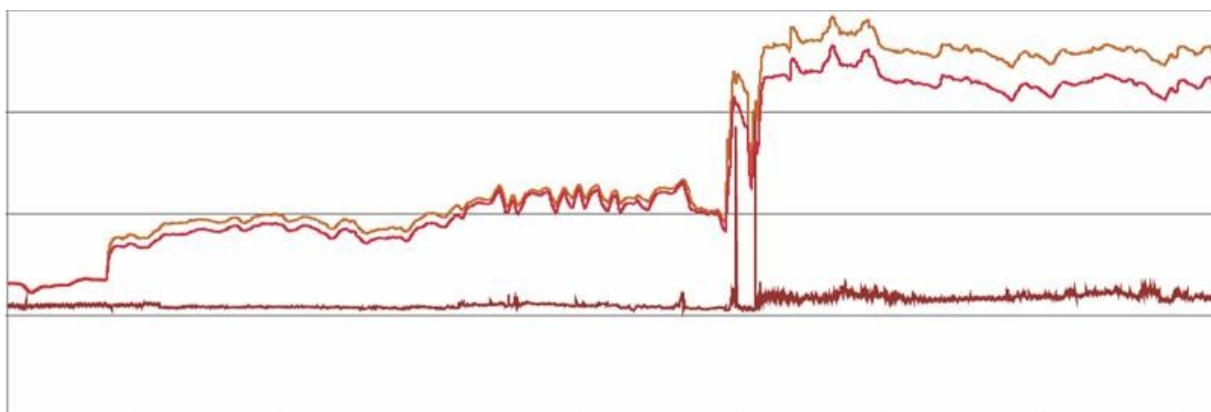
Graf 3.2: Další příklad doběhové části grafu

Na grafech 3.3 a 3.4 vidíme rozběh kompresoru, obě strany, jak na straně pohonu, tak na slepé straně, z čehož jde krásně vidět, jak je strana pohonu méně náchylná k vibracím, jelikož je lépe osově uchycena než slepá strana ucpávky, opět jen pro připomenutí, v grafech je barvou vibračního čidla tmavě červená, zatímco světle červená a oranžová přísluší teplotním čidlům, u kterých vidíme jako u předchozích po rozběhu kompresoru stoupání teploty až na provozní hodnoty. Když detailněji

porovnáme grafy, vidíme, že po počátečním zvýšení vibrací na slepé straně se po chvíli vibrace začínou snižovat až se postupně ustálí.

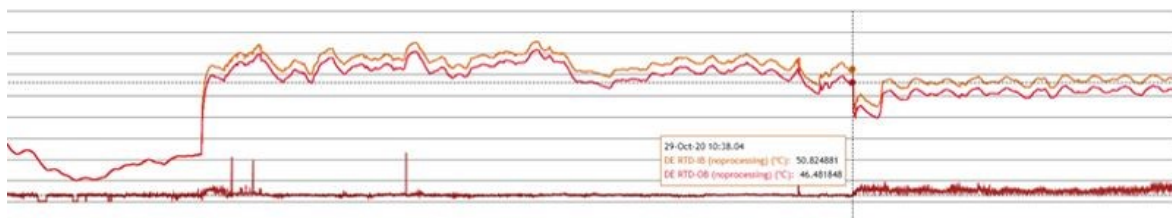


Graf 3.3: Příklad rozběhu kompresoru, ucpávka na slepé straně



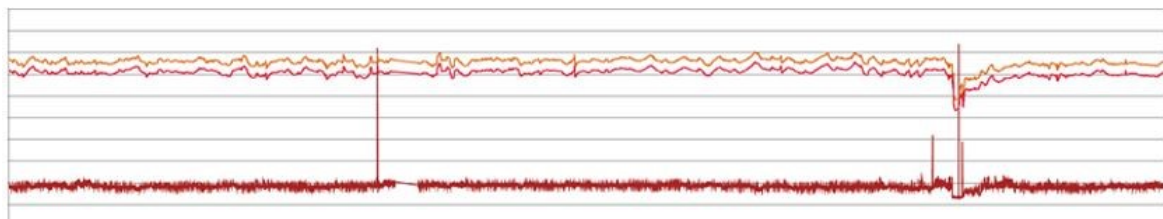
Graf 3.4: Příklad rozběhu kompresoru, ucpávka na straně pohonu

Na grafu 3.5 vidíme rozběh kompresoru, tentokrát s předeřevem, proto už od začátku měření vidíme zvyšování teploty, dále si zde lze všimnout menších špiček u funkce vibračního čidla, které, jelikož se staly před rozběhem, značí údržbu kompresoru, která samozřejmě jako odezvu vyvolá vibraci.



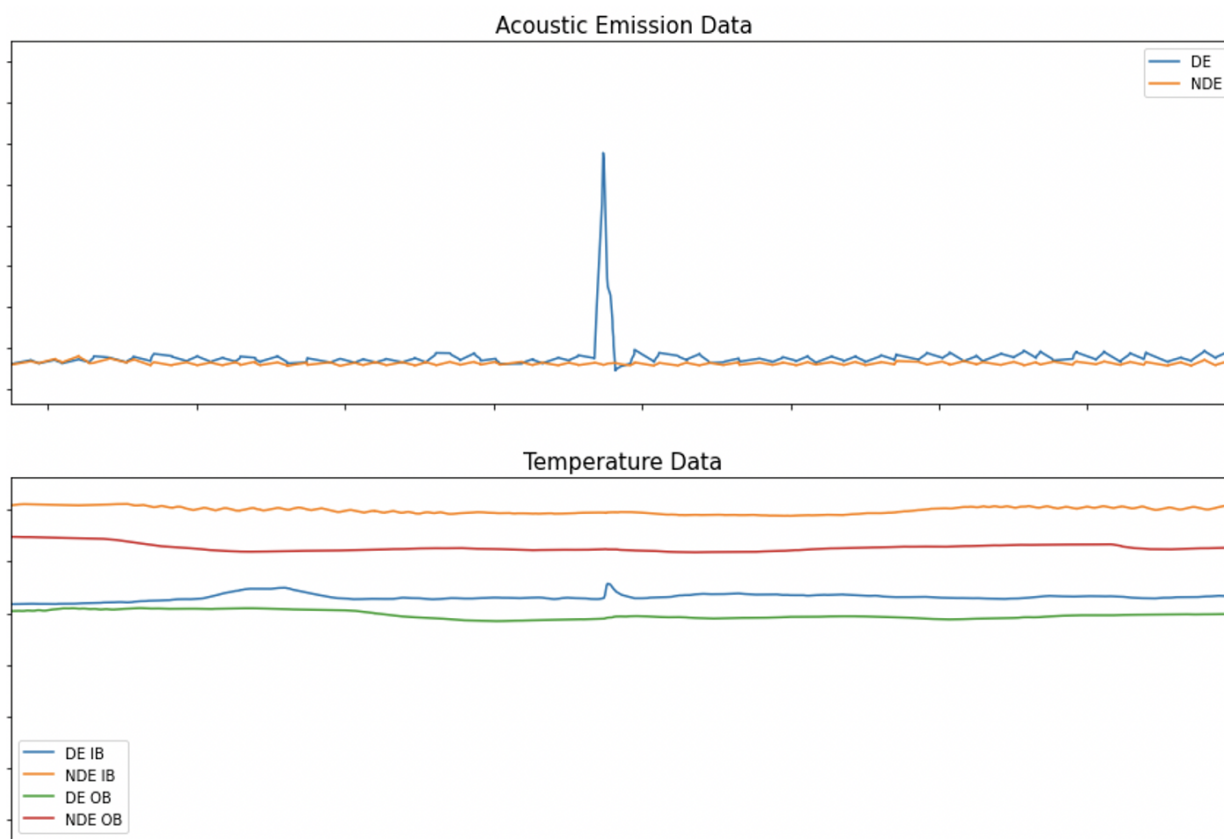
Graf 3.5: Příklad rozběhu kompresoru s předeřevem a údržbou

Na grafu 3.6 vidíme chod kompresoru, kde zákazník řízeně zkoušel otevírat sací ventil, což způsobilo pokles tlaku, což se projevilo špičkami u funkce vibračního čidla, tj. kontaktem sedla a čela, což se krátkodobě dá tolerovat (viz například kontakt při rozběhu), ovšem dlouhodobě je velice, velice nežádoucí s potenciálem způsobit havárii ucpávky, a tím pádem i celého kompresoru.



Graf 3.6: Příklad normálního rozběhu kompresoru s krátkým uzavřením sacího ventilu

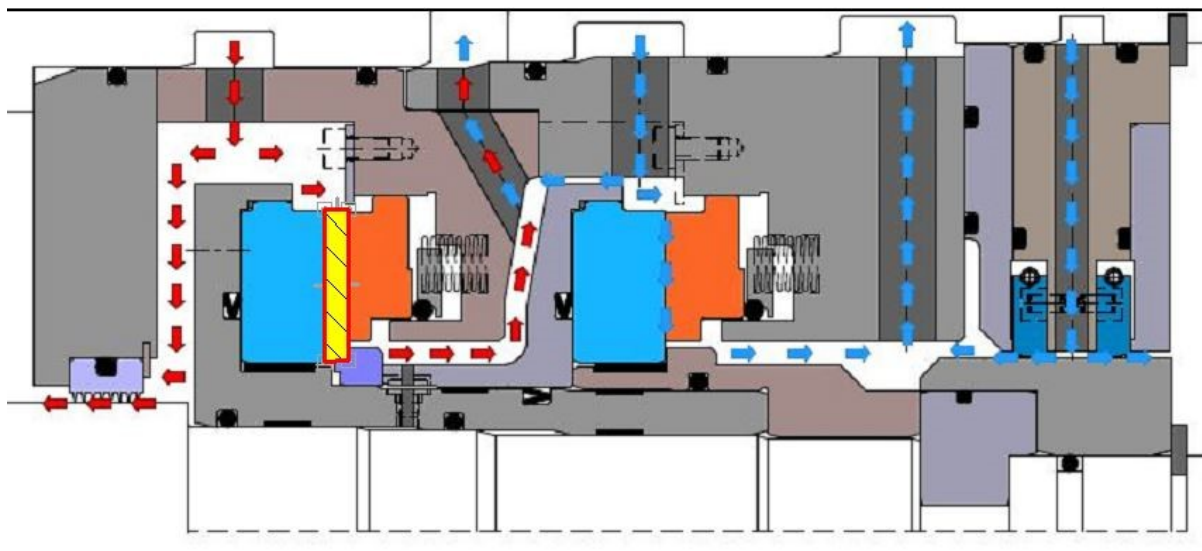
Sedmý graf, který představím (graf 3.7), už bude ukazovat poruchu kompresoru.



Graf 3.7: Porucha kompresoru

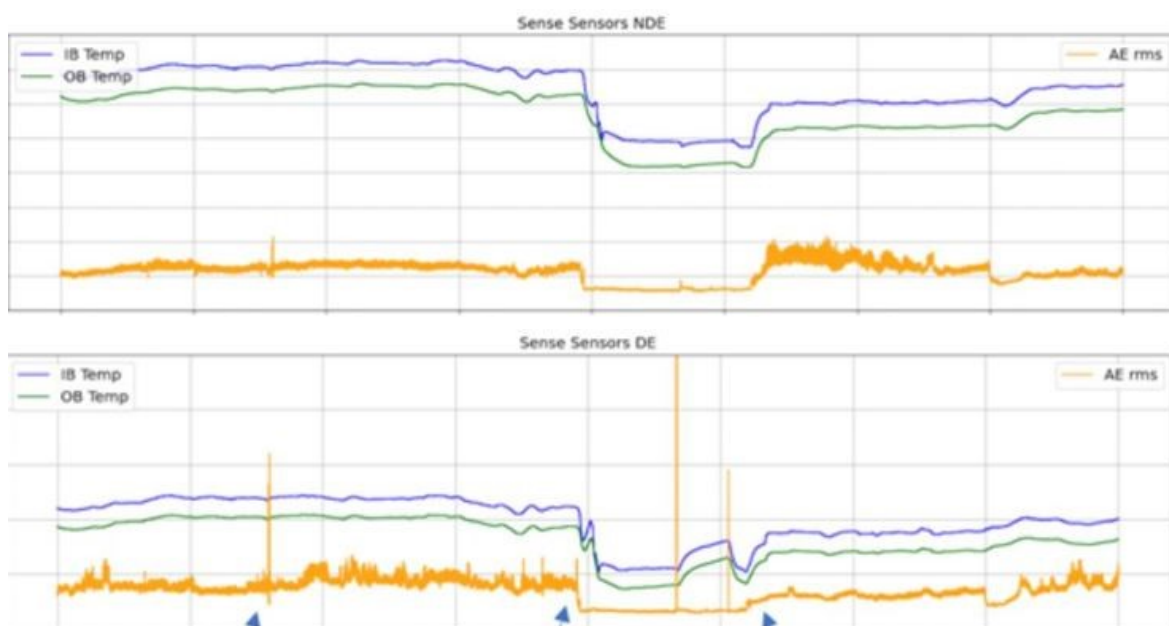
Nejprve drobná poznámka, proměnné jsou shodné s grafem 3.1, taktéž jejich barvy a značení.

Jaká porucha je tedy vidět na těchto datech? Zhruba ve středu obou grafů vidíme špičku, jak u vibračního čidla v ucpávce na straně pohonu, tak u vnitřního teplotního čidla v ucpávce na straně pohonu. Po rozboru dat a informací od zákazníka bylo zjištěno, že za touto poruchou stojí sací ventil kompresoru, který se otevíral a zavíral ve špatných intervalech, což způsobilo snížení tlaku uvnitř kompresoru a samozřejmě i ucpávky, což vedlo ke kontaktu sedla a čela, což vyvolalo špičky, které vidíme na grafu 3.2, na obr. 3.1 je vyznačeno v jakém místě ucpávky došlo ke kontaktu sedla a čela. Jak tuto poruchu opravit? Zákazník musel upravit intervaly otevírání a zavírání sacího ventilu kompresoru.



Obr. 3.1: Ucpávka s vyznačením místa projevu poruchy, žlutý obdélník

Dále představím data ucpávky instalované v Argentině (graf 3.8), celkový průběh, kde oranžová reflektuje vibrační čidlo, modrá vnitřní teplotní a zelená vnější teplotní čidlo. Vrchní část grafu náleží ucpávce na slepé straně a spodní část grafu náleží ucpávce na straně pohonu.

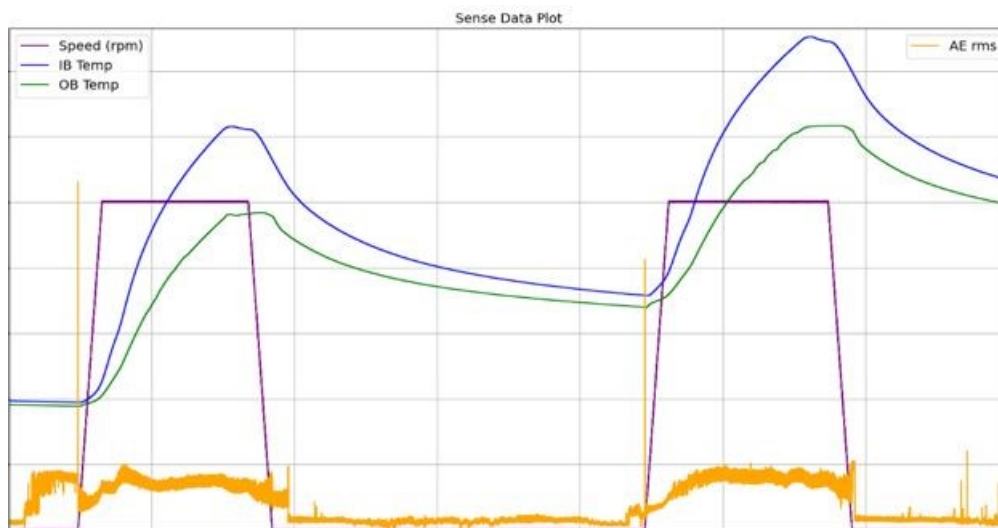


Graf č. 3.8: Data z Argentinské ucpávky, přehled

Na tomto grafu můžeme pozorovat vznik poruchy, opravu a opětovné uvedení do provozu. Když půjdeme zleva, tak si můžeme všimnout první špičky u vibračního snímače, která byla způsobena problémy s funkcí ventilu u primárního části těsnění ucpávky, takto se projevila kvůli poklesu tlaku, a tedy následně kontaktem sedla a čela, ve chvíli, kdy byla porucha pozorována, zákazník kompresor zastavil, jak je vidět ve střední části grafu, kde jsou špičky vibračního snímače způsobeny manipulací a údržbou a opravou kompresoru. V poslední části grafu je vidět postupný

opětovný náběh kompresoru, proč při tomto náběhu není vidět špička u vibračního snímače od kontaktu sedla s čelem? Tato ucpávka je tzv. slow roll, který je vysvětlen výše.

Poslední graf (graf č. 3.9), který zde představím jeden, který je z interní firemní zkušebny, který vznikl při testování v testovací buňce. Na tomto grafu jsou data z vibračního snímače znázorněny oranžovou barvou, vnitřní teplotní snímač je znázorněn modrou barvou, vnější teplotní snímač je znázorněn zelenou barvou a rychlost je znázorněna fialovou barvou.



Graf č. 3.9: Data z testování ucpávky

Když tento graf rozeberu, tak na něm můžeme vidět dva rozběhy a doběhy, krásně je to vidět na křivce rychlosti, která jde dvakrát zřetelně vzhůru a zase dolů, co je zde velmi zajímavé a stojí za pozornost, je závislost rychlosti při rozběhu ucpávky a špičky u vibračního snímače, kde zřetelně vidíme, že při dosažení určité rychlosti (lift off speed, viz předchozí) nastane špička, která reprezentuje dotyk sedla a čela. Zároveň vidíme zajímavý teplotní průběh, na začátku je teplota nízká, po prvním rozběhu ucpávky stoupá, po doběhu začne zvolna klesat, po druhém rozběhu teplota opět roste, po druhém rozběhu opět klesá. Zajímavé je též celkově sledovat průběh funkce vibračního snímače, kdy při prvním rozběhu stoupá až po špičku a poté se ustálí na víceméně konstantní hodnotě, po prvním doběhu klesne na víceméně konstantní hodnotu, při druhém rozběhu opět stoupá až ke špičce a klesne na víceméně konstantní hodnotu a po druhém doběhu též klesne. Drobné špičky vibračního snímače na úplném konci grafu jsou způsobeny manipulací.

3.3 Celkové shrnutí měření

Jak lze na všech devíti grafech vidět, je velice prospěšné mít přesnou zpětnou vazbu dějů v ucpávce, pomáhají nám za prvé identifikovat poruchu (ve smyslu její existence), dříve, než-li se projeví ve větším rozsahu, přičemž samozřejmě způsobí větší jak materiálové, tak peněžní škody. Dále díky získaným datům můžeme zpětně analyzovat průběh poruchy pro budoucí přesnější

a včasnější diagnostiku, čímž se opět vracíme k vyšší spolehlivosti strojního celku, a tudíž snížení nákladů. Ještě jednou bych ráda zdůraznila, že data z průsakového snímače zde nikde nejsou, jelikož jsou v podstatě digitálního charakteru, tedy kape/nekape a jen dle přesné hodnoty, kterou snímač sejme lze říci, jaká kapalina způsobila průsak, například voda či olej z ložisek (ve chvíli kdy z ložisek prosakuje olej je samozřejmě zle a je třeba nastalou situaci řešit) a bohužel také ještě není žádný průsakový snímač v provozu, tudíž ještě nemáme data z reálného provozu. Další důležitou poznámkou by asi mělo být, že zatím žádná ucpávka s instalovanými snímači neselhala, a tudíž bohužel nemáme takováto data. Ani při testech ucpávek v testovacích buňkách se nezkoušelo selhání ucpávky, ze zřejmých důvodů strachu, co by se mohlo stát. Dále, jak už bylo zmíněno, nám instalace snímačů umožňuje nepřetržitý dohled nad ucpávkou díky GSM modulu.

4 Důsledky poruch v ucpávkách

V této kapitole si představíme, jaké důsledky mají poruchy v ucpávkách, jaký vliv mají na těsnící stranu sedla a čela, co dané poruchy způsobilo, na jednotlivých fotografiích reálných součástí ucpávek z reálného provozu přímo od servisního oddělení John Crane.

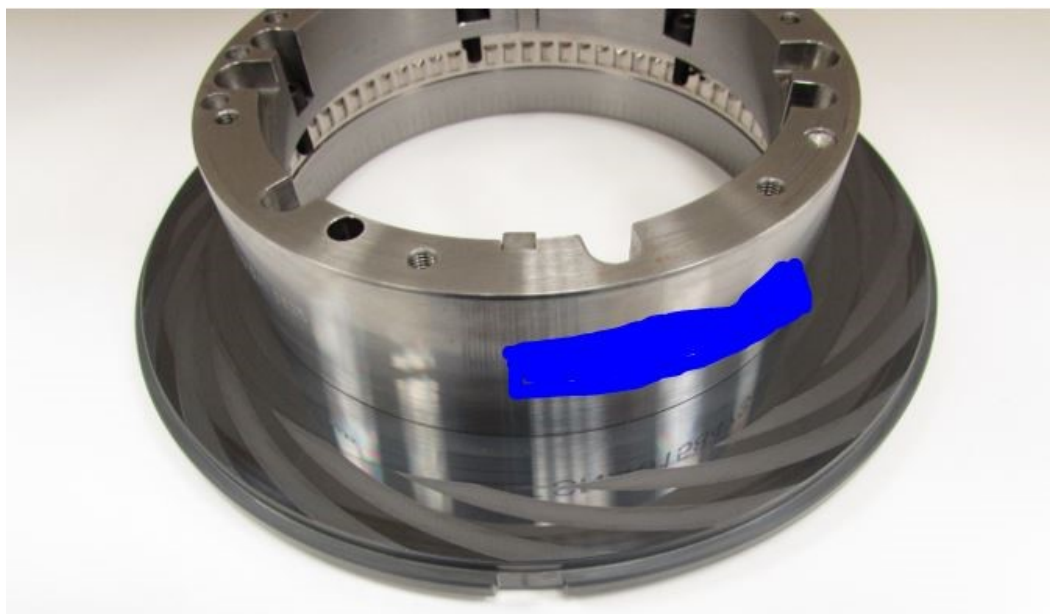
4.1 Příklady důsledků poruch v ucpávkách

V této kapitole uvidíme reálné důsledky poruch v ucpávkách způsobených různými vlivy, které budou vždy definovány. Jelikož je třeba dodržovat politiku firemního tajemství, tudíž jsou tedy všechny ucpávky anonymní, což nám ovšem nebrání ve vyhodnocení poruchy. Na následujících fotografiích bude vždy vyobrazeno sedlo a čelo, v některých případech ještě zasazené do dílů rotoru či stator, u každé fotografie bude vysvětleno. Důležitá poznámka, modré obdélníky jsou na fotografiích z důvodu zakrytí identifikace ucpávky, vzhledem k zachování firemního tajemství.

Na obr. 4.1 a 4.2 prezentují sedlo a čelo, kde je na čele vyštípnutý kus materiálu, což je způsobeno kontaktem sedla a čela kvůli nesprávnému zakřivení čela na těsnící ploše. Na obr. 4.1 vidíme čelo s vyštípnutým kusem materiálu, na obr. 4.2 vidíme sedlo, uložené v části rotoru, lze na něm pozorovat poškrábání na těsnící straně a je také možné vidět reálný vzhled drážek na sedle.

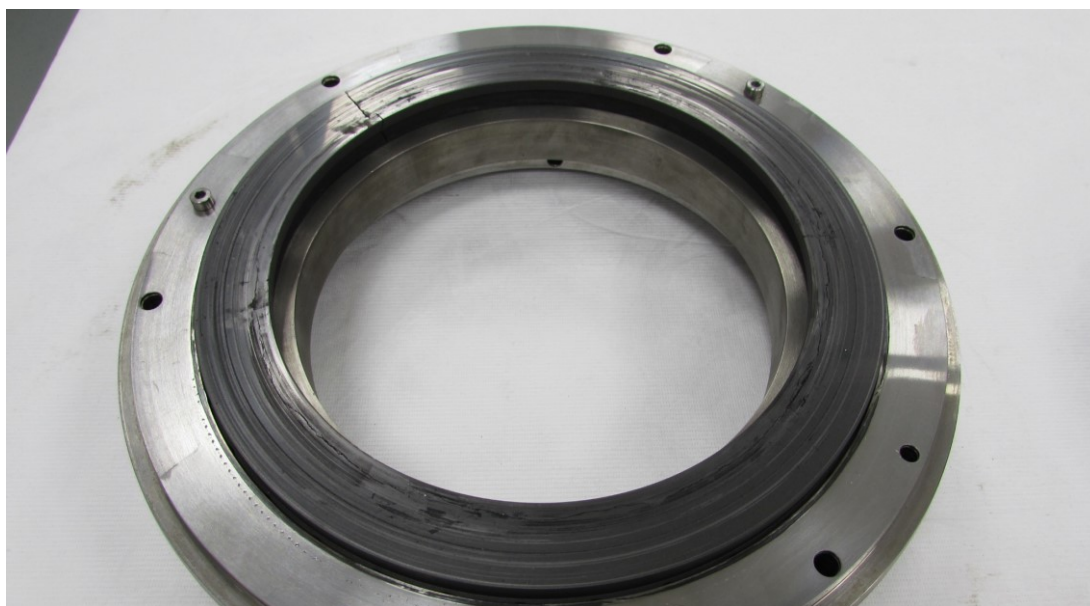


Obr. 4.1: Čelo s vyštípnutými kusy

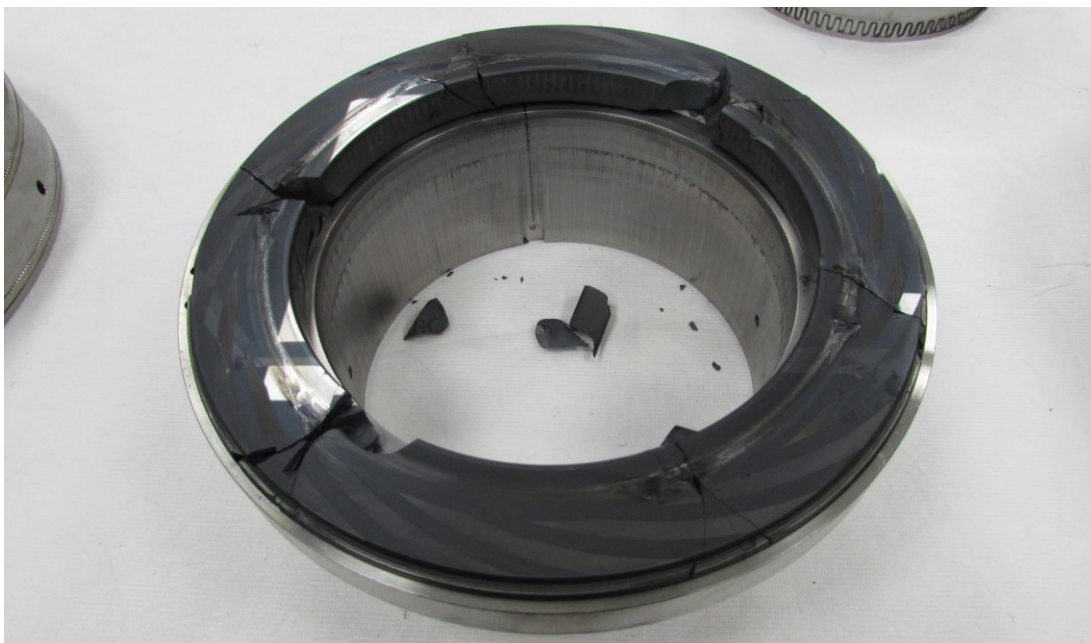


Obr. 4.2: Sedlo poškrábané na těsnící straně

Na obr. 4.3 a 4.4 prezentují sedlo a čelo po selhání ucpávky z důvodu generace velkého množství tepla způsobeného kontaktem sedla a čela. Na obr. 4.3 vidíme čelo v instalované v části statoru, které je naprosto zřejmě velmi vážně poškrábané, na obr. 4.4 vidíme sedlo uložené v části rotoru, které krom toho, že je též poškrábané, je doslova rozpadlé na kusy.

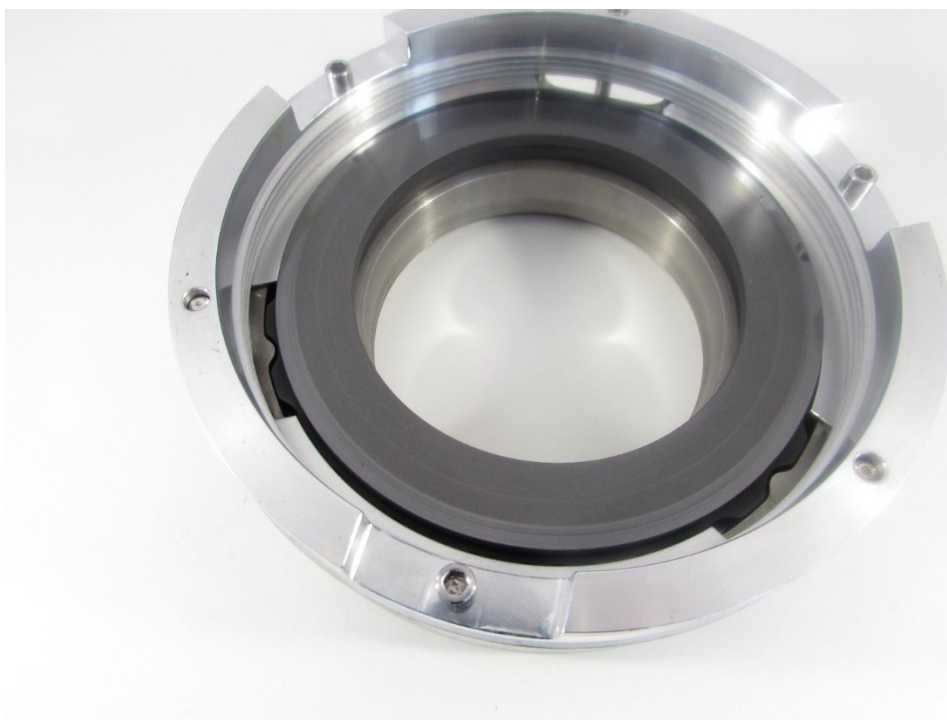


Obr. 4.3: Čelo se zřetelným poškrábáním

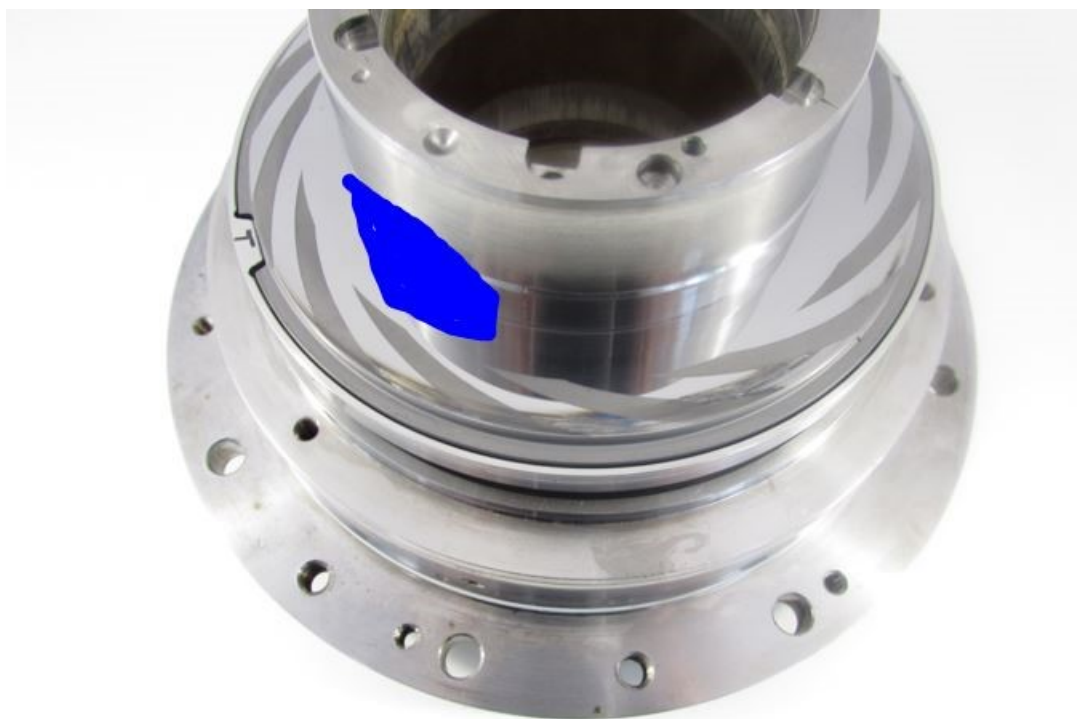


Obr. 4.4: Sedlo se zřetelným poškrábáním a rozpadlé na kusy

Na následujících obr. 4.5 a 4.6 prezentuji poškození sedla a čela z důvodu špatného osového seřízení rotoru a statoru, které způsobilo pouze částečný kontakt sedla a čela, a tudíž poruchu ucpávky. Na obr. 4.5 vidíme čelo instalované v části statoru, které je „sjeté“ jen na vnějším těsnícím průměru, na obr. 4.6 vidíme sedlo instalované v rotoru s poškrábaným vnějším průměrem.



Obr. 4.5: Čelo se „sjetým“ vnějším průměrem



Obr. 4.6: Sedlo s poškozeným vnějším průměrem

Na obr. 4.7 a 4.8 prezentuji sedlo a čelo, které selhali při rozběhu kompresoru, při dosažení lift off speed (viz předchozí) nedokázaly vytvořit těsnící fluidní vrstvu a jak víme z předešlého, ucpávka tedy nemohla fungovat. Důvodem nevytvoření těsnící fluidní vrstvy bylo nesprávné zakřivení těsnící strany jak sedla, tak čela. Na obr. 4.7 vidíme čelo instalované ve statoru, které na první pohled nemá žádné poškození, ovšem má špatné zakřivení, na obr. 4.8 vidíme sedlo instalované v rotoru, které též nemá žádné viditelné poškození, zajímavost, které si můžeme na sedle všimnout, jsou drážky pro obousměrný běh ucpávky.

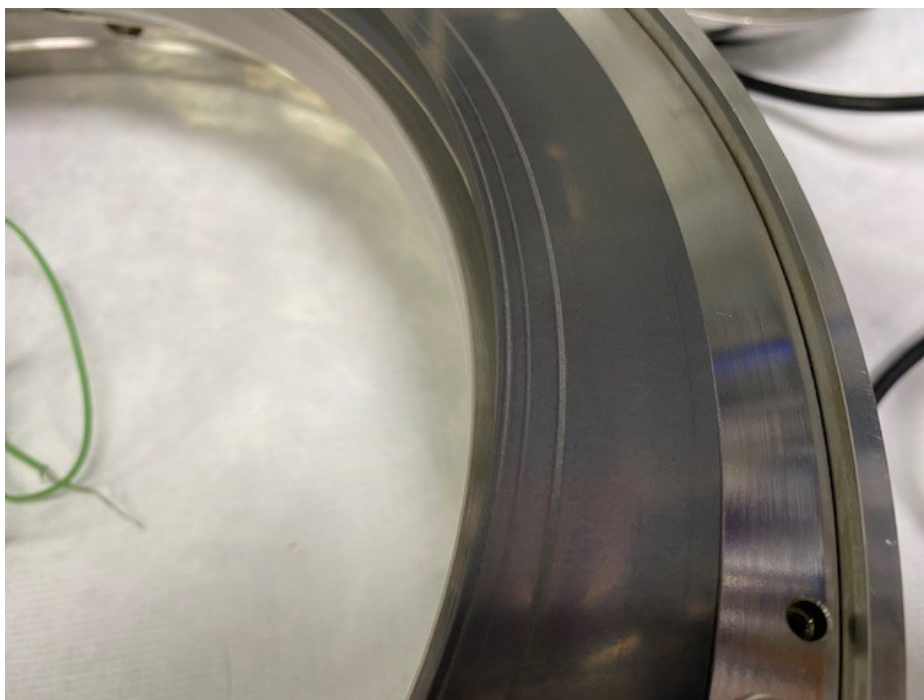


Obr. 4.7: Čelo bez viditelného poškození, ovšem se špatným zakřivením



Obr. 4.8: Sedlo bez viditelného poškození s krásně viditelnými obousměrnými drážkami

Na obr. 4.9, 4.10 a 4.11 prezentují sedlo a čelo poškozené během zkoušek v testovací buňce, nečistoty neznámého původu poškodily čelo tak moc, až se v něm objevila drážka (jelikož z dvojice sedlo-čelo je čelo vždy součástka s nižší tvrdostí) a lehce bylo poškozeno i sedlo. Čelo bylo nutno vzhledem k poškození zlikvidovat. Na obr. 4.9 vidíme čelo instalované ve statoru, přiblíženo na poškození, na drážku, na obr. 4.10 vidíme celkový pohled na poškozené čelo a na obr. 4.11 vidíme sedlo instalované v rotoru, na kterém lze pozorovat taktéž známky poškození.



Obr. 4.9: Přiblížený pohled na poškozené čelo



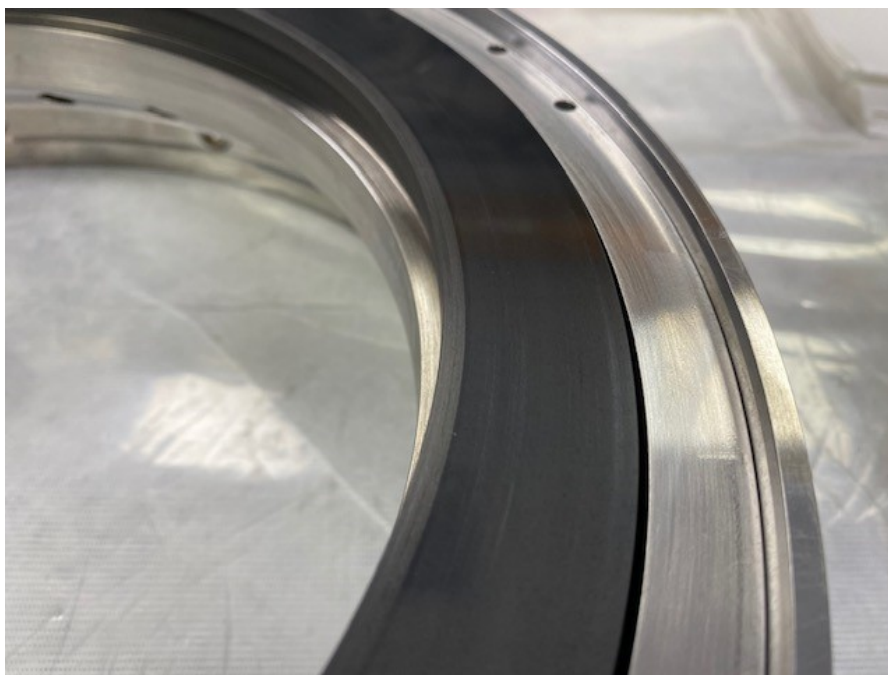
Obr. 4.10: Celkový pohled na poškozené čelo



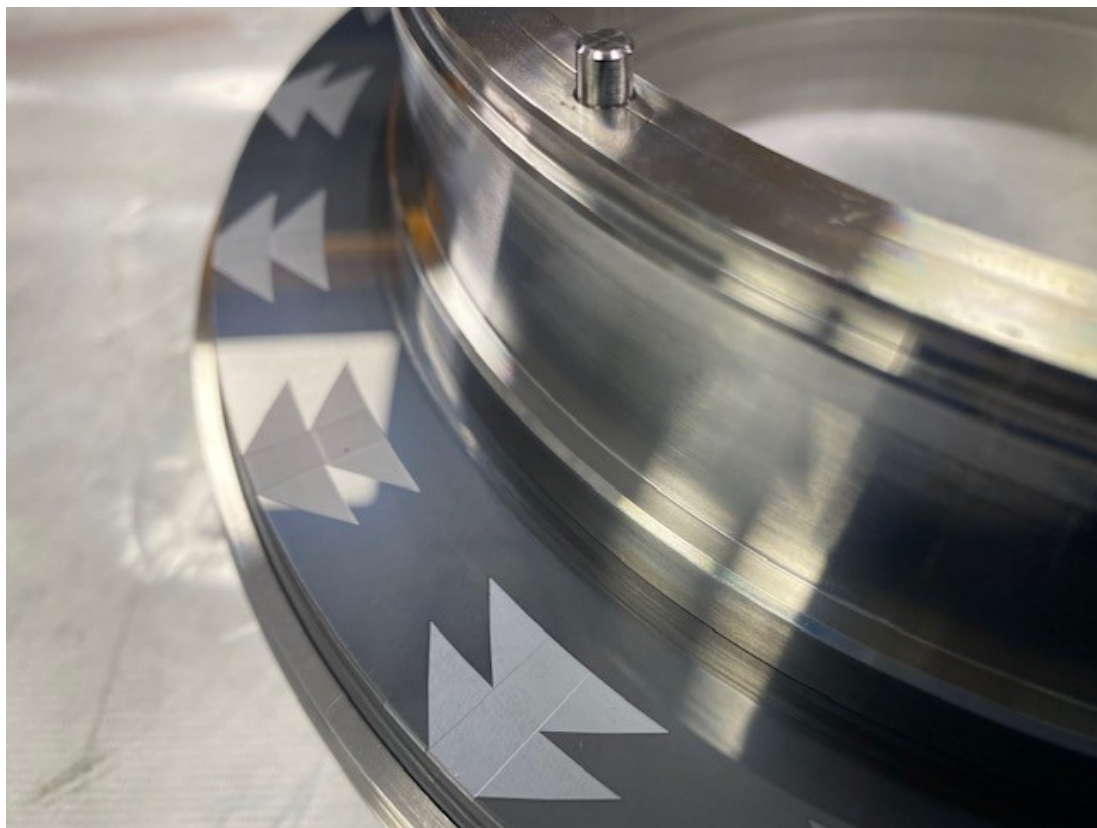
Obr. 4.11: Přiblížený pohled na poškozené sedlo.

Na obr. 4.12 a 4.13 prezentují sedlo a čelo, které během testování v testovací buňce utrpěly poškození z přehřátí, kdy byla v ucpávce vyvolána přidáním teploty tak razantním, až vzhledem k roztažnosti došlo ke kontaktu sedla s čelem, který je samozřejmě nežádoucí. Sedlo lze ještě repasovat, ovšem čelo už je nenávratně zničeno. Na obr. 4.12 vidíme čelo instalované ve statoru se

zřetelným opotřebením na vnitřním průměru. Na obr. 4.13 vidíme sedlo s taktěž opotřebovaným vnitřním průměrem.



Obr. 4.12: Čelo po nežádoucím kontaktu se sedlem



Obr. 4.13: Sedlo poškozené kontaktem s čelem

Na obr. 4.14 a 4.15 prezentuji sedlo a čelo poškozené takzvanou explozivní dekompresí způsobenou selháním o kroužku za čelem, tedy tím, že o kroužek za čelem selhal, čímž způsobil

radikální pokles tlaku mezi těsníci plochami sedla a čela, což způsobilo ztracení fluidní těsnící vrstvy a tím nežádoucí kontakt sedla a čela. Na obr. 4.14 vidíme čelo instalované ve statoru poškozené kontaktem se sedlem a na obr. 4.15 vidíme sedlo instalované v rotoru poškozené kontaktem s čelem.



Obr. 4.14: Čelo poškozené explozivní dekompresí

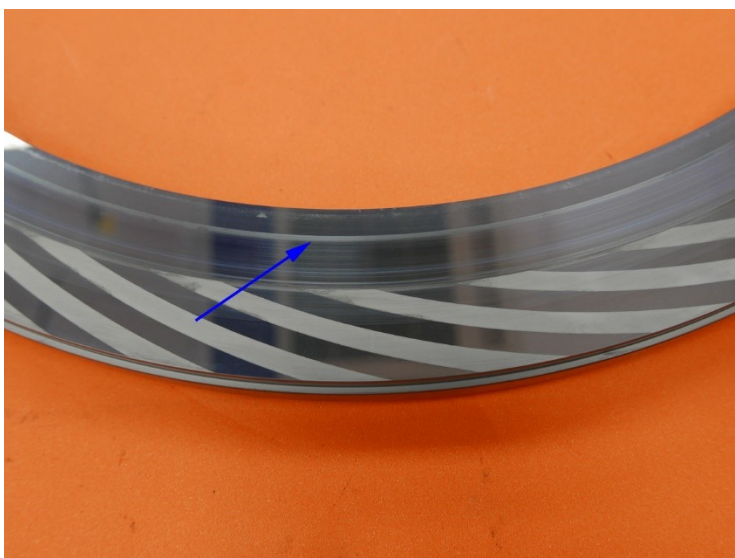


Obr. 4.15: Sedlo poškozené explozivní dekompresí

Na obr. 4.16 a 4.17 prezentují sedlo a čelo poškozené kontaminací ucpávky nečistotami a kapalinami, jak na sedle, tak i na čele jsou viditelně „vyjeté“ drážky, což samozřejmě způsobilo zhoršení funkčnosti ucpávky, až její nefunkčnost. Na obr. 4.16 vidíme čelo se zřetelnou drážkou způsobenou vnikuvšími nečistotami. Na obr. 4.17 vidíme sedlo též poškozené nečistotami.

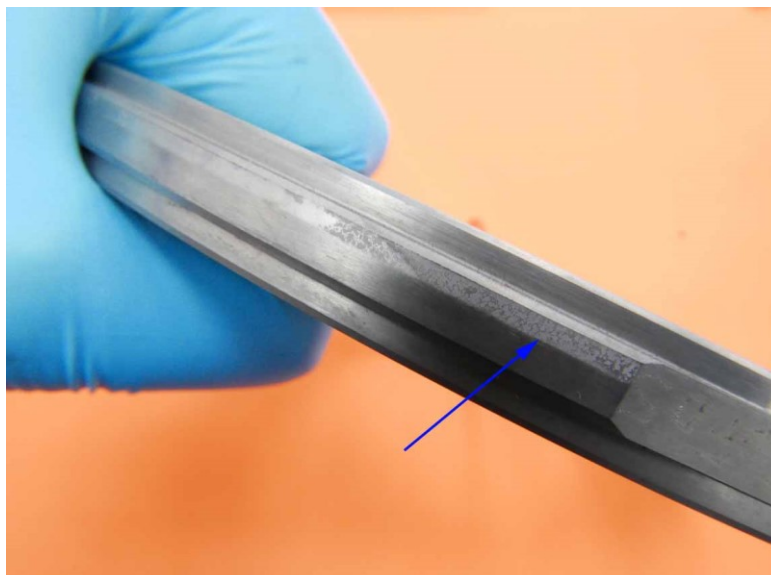


Obr. 4.16: Čelo poškozené vniknuvšími nečistotami

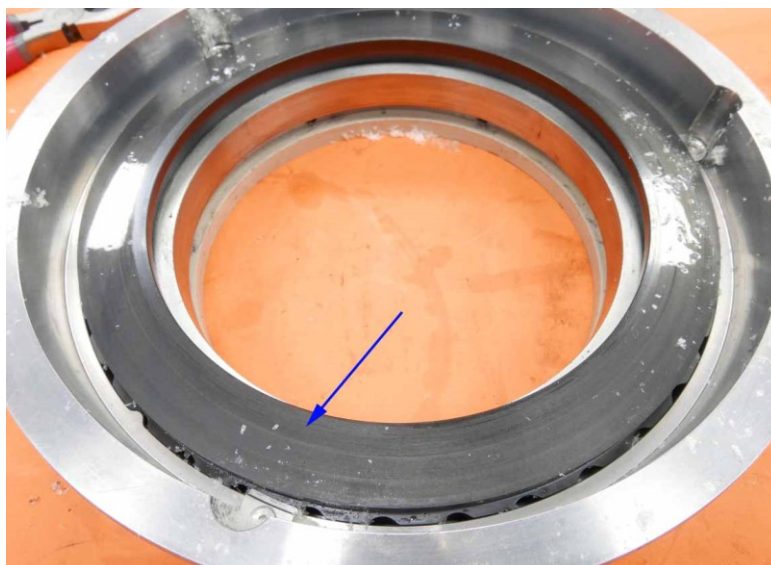


Obr. 4.17: Sedlo poškozené nečistotami

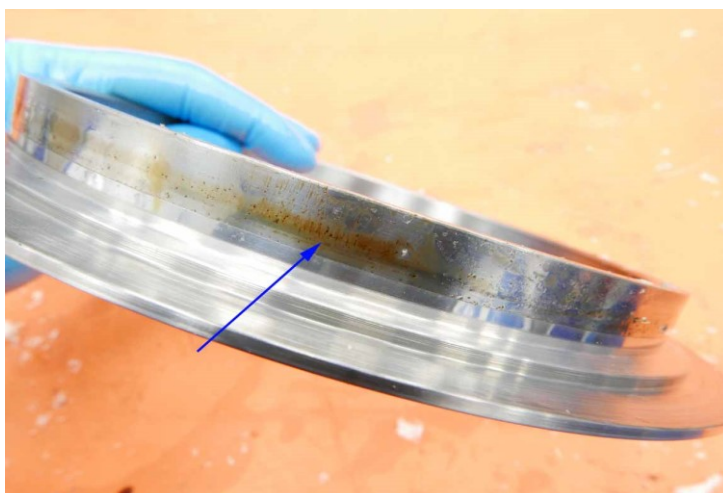
Na obr. 4.18 až 4.25 prezentuji celkový pohled na jednu ucpávku, u které byla diagnostikována velice závažná vada, a to koroze způsobena mokrým čistým hydrocarbonem (uhlovodíkem), tato koroze se projevila různě na různých částech ucpávky a na následujících fotografiích si následky rozebereme. Na obr. 4.18 vidíme sedlo, pohled z boku, na kterém je vidět korozní reakce. Na obr. 4.19 vidíme poškození čela ne přímo korozí, ale nečistoty způsobené korozí se dostaly do těsnící mezery mezi sedlem a čelem, což čelo poškodilo. Na obr. 4.20 vidíme carrier (přítlačný element ucpávky, je umístěn mezi čelem a přítlačnými pružinami), na kterém je naprosto zřejmé poškození korozí. Na obr. 4.21 vidíme korozní poškození na sedle. Na obr. 4.22 vidíme korozní poškození na dílu statoru. Na obr. 4.23 vidíme korozní poškození na díle rotoru. Na obr. 4.24 vidíme korozní poškození na šroubu na statoru ucpávky. Na obr. 4.25 vidíme další příklad korozního působení na šroub a díl rotoru ucpávky.



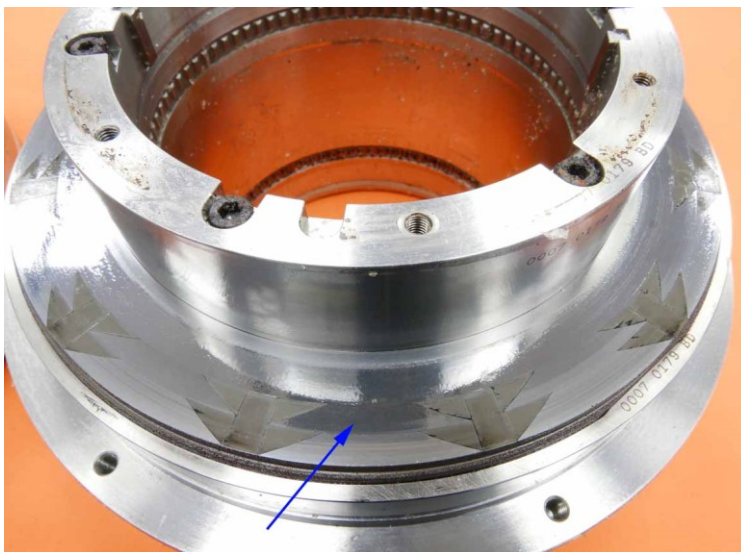
Obr. 4.18: Projevy koroze na sedle



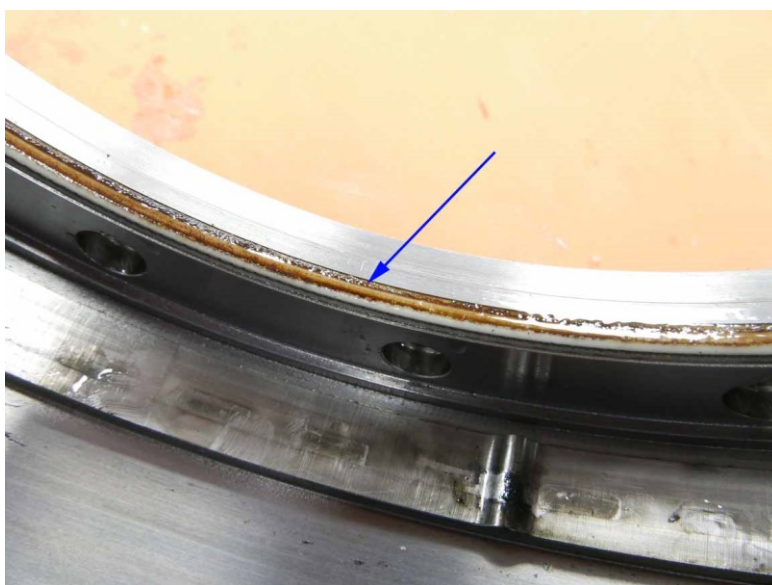
Obr. 4.19: Čelo poškozené nečistotami vzniklými korozí



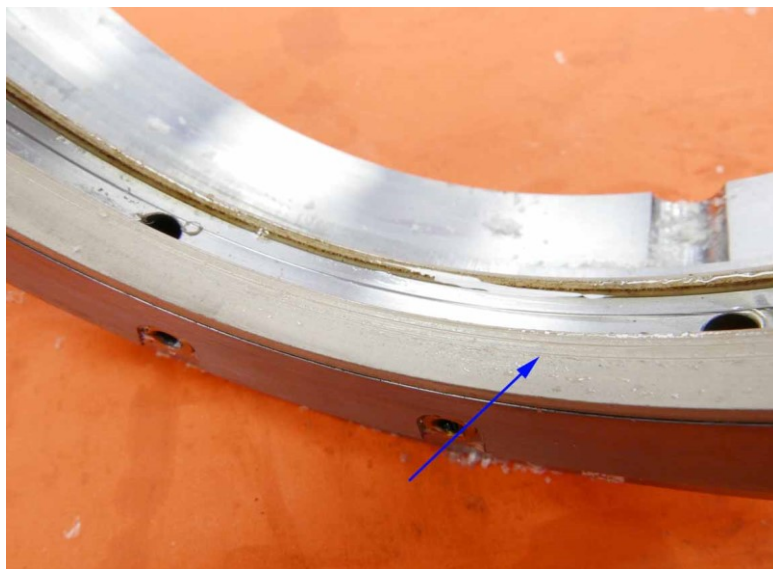
Obr. 4.20: Korozní poškození na carrieru



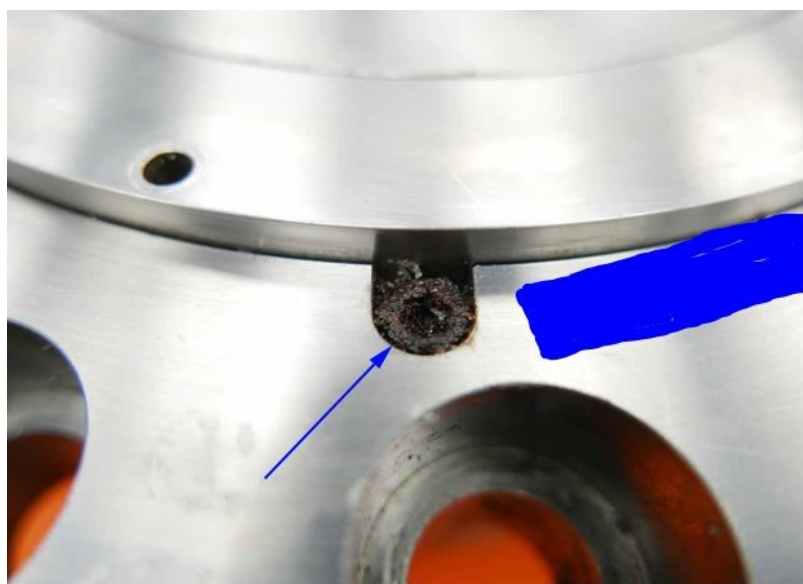
Obr. 4.21: Korozní poškození sedla



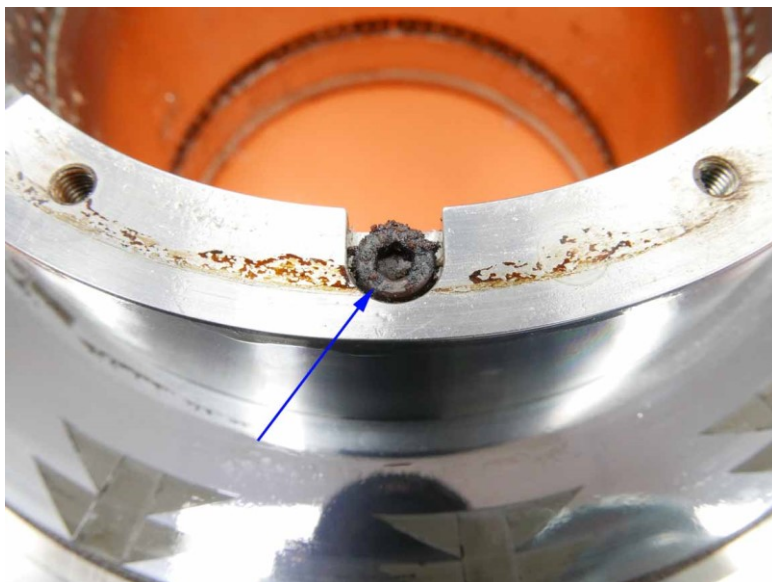
Obr. 4.22: Korozní poškození dílu statoru



Obr. 4.23: Korozní poškození dílu rotoru



Obr. 4.24: Korozní poškození šroubu

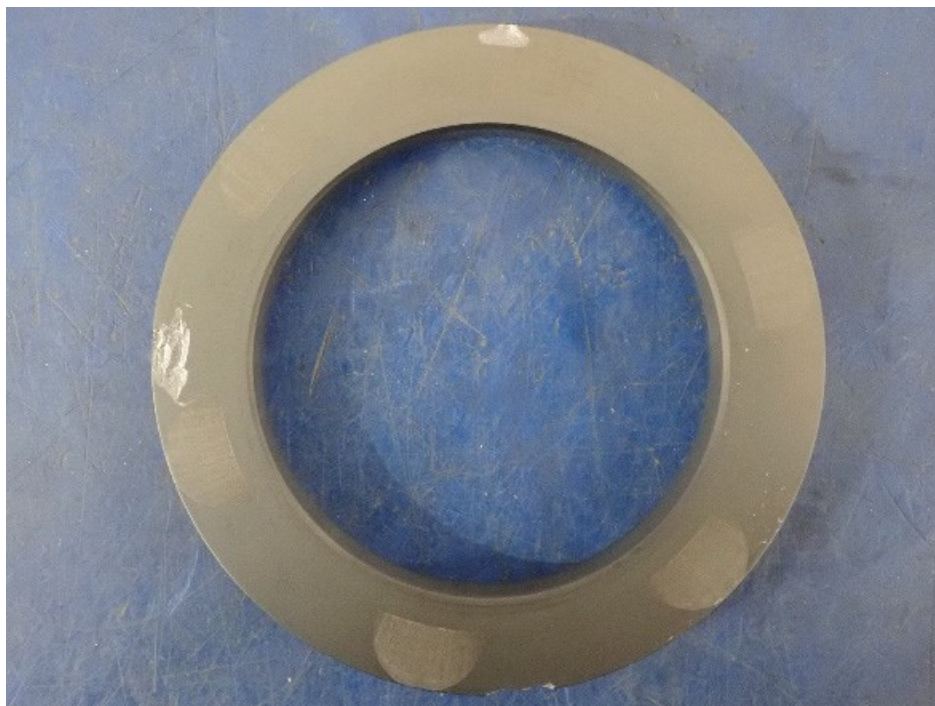


Obr 4.25: Korozní poškození a šroubu

Na obr. 4.26 až 4.30 prezentují zajímavou poruchu ucpávky způsobenou zbytky kapaliny v ucpávce z montáže a poruchou činnosti kompresorové řídicí jednotky, na obr. 4.26 vidíme čelo s doslova vytrženými kusy materiálu. Na obr. 4.27 vidíme sedlo poškozené stejným způsobem. Na obr. 4.28 vidíme poškození karbonového kroužku separation seal, taktéž můžeme pozorovat kusy vytrženého materiálu. Na obr. 4.29 vidíme poškození na části rotoru. Na obr. 4.30 vidíme poškození labyrintu způsobené vytrženými kusy materiálu (viz předchozí fotografie).



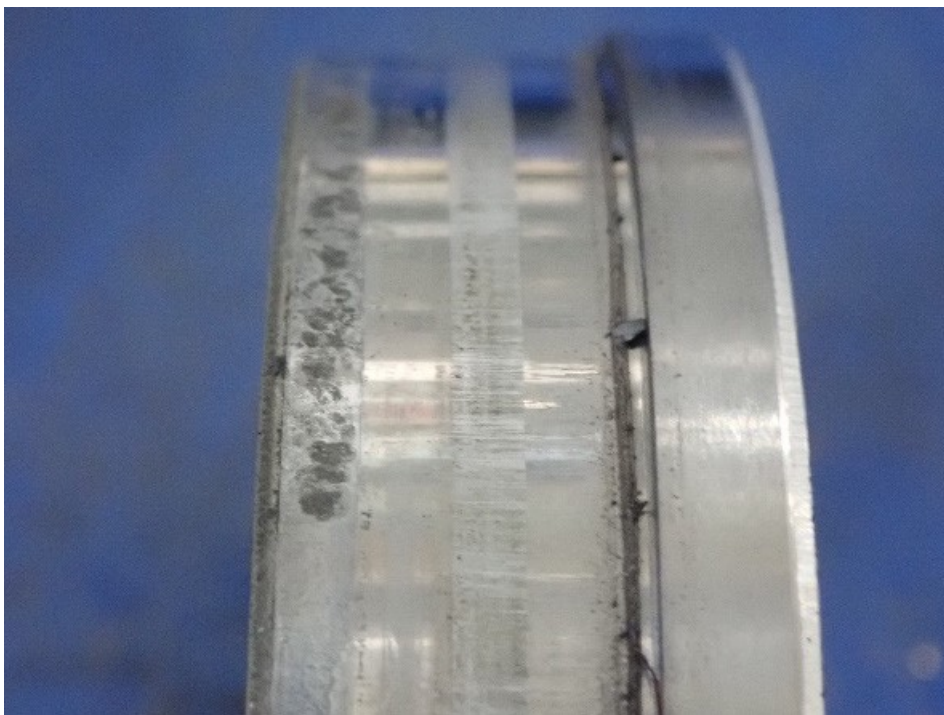
Obr. 4.26: Čelo s vytrženými kusy materiálu



Obr. 4.27: Sedlo s vytrženými kusy materiálu



Obr. 4.28: Poškozený karbonový kroužek



Obr. 4.29: Poškození části rotoru



Obr. 4.30: Poškozený labyrint

Zde jsou tedy některé z případů poruch, které se mohou v ucpávkách vyskytnout, nemohou zde být ani zaznamenány všechny, jelikož možných poruch či vad v ucpávce či kompresoru je nepřehledné množství. Zásadním problémem je vždy buď kontakt sedla a čela nebo vnik kapaliny a následné korozní poškození ucpávky, popřípadě oba faktory, které mohou být způsobeny mnoha poruchami. Standardním postupem při závadě je odvést porouchanou ucpávku do servisního centra, kde se pod neustálým dohledem kamer (pro prokazatelnost celého procesu) ucpávka

rozebere do posledního šroubku, každá součástka se prohlédne a na základě ohledání se určí (diagnostikuje) důvod závady, který se pak samozřejmě řeší, na základě toho, jaká závada je zjištěna.

5 Závěry a zhodnocení práce

V této práci jsem vytyčila za cíl popsat problematiku mechanických plynových ucpávek a použití snímačů v nich, což bylo splněno. Mým dalším cílem bylo interpretovat výstupy ze snímačů, kde jsem popsala výstup z měření normálního rozběhu, běhu a doběhu ucpávky, potažmo kompresoru, dále se věnuji vysvětlení měření při poruše ucpávky (či kompresoru, záleží samozřejmě na konkrétní poruše), projevech dané poruchy v grafu a jejím důsledkům. Věnuji se též fyzickým projevům poruch ucpávek či kompresorů a chyb při výrobě či montáži.

Poděkování:

Chtěla bych poděkovat za prvé vedoucímu své práce, Ing. Blatovi, Ph.D., dále své firmě John Crane, která mi umožnila zpracovat interní téma v podobě bakalářské práce, a zvláště bych chtěla poděkovat kolegům Ing. Pavlu Krobotovi, Ing. Bohumíru Dragounovi, Stevu Beckovi, Ing. Kate Schuetz, PhDr., Colleen Fritz, MEng. Christopherovi Palmerovi a Bc. Kevinu Dweyerovi, Christine Twist, Ph.D., kteří mi poskytli podporu a cenné konzultace.

Seznam použitých zdrojů

- [1] International Standard NACE MR0175. *Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production*. Houston: NACE International, 2015, ISBN: MR0175/ISO15156.
- [2] ČSN ISO 15156. *Naftový a plynárenský průmysl - Materiály pro využití v prostředí obsahujícím H₂S z těžby ropy a zemního plynu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 24 s., třídící znak: 450032.
- [3] International Standard NACE MR0103. *Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments*. Houston: NACE International, 2015, ISBN: 1-57590-168-4.
- [4] API Standard 617. *Axial and Centrifugal Compressors and Expandercompressors*. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 2014, 374 s.
- [5] API Standard 692. *Dry Gas Sealing Systems for Axial, Centrifugal, and Rotary Screw Compressors and Expanders*. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 2018, 258 s.
- [6] API Standard 521. *Pressure-Relieving and Depressuring Systems*. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 2014, 248 s.
- [7] API Standard 526. *Flanged Steel Pressure-relief Valves*. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 2017, 53 s.